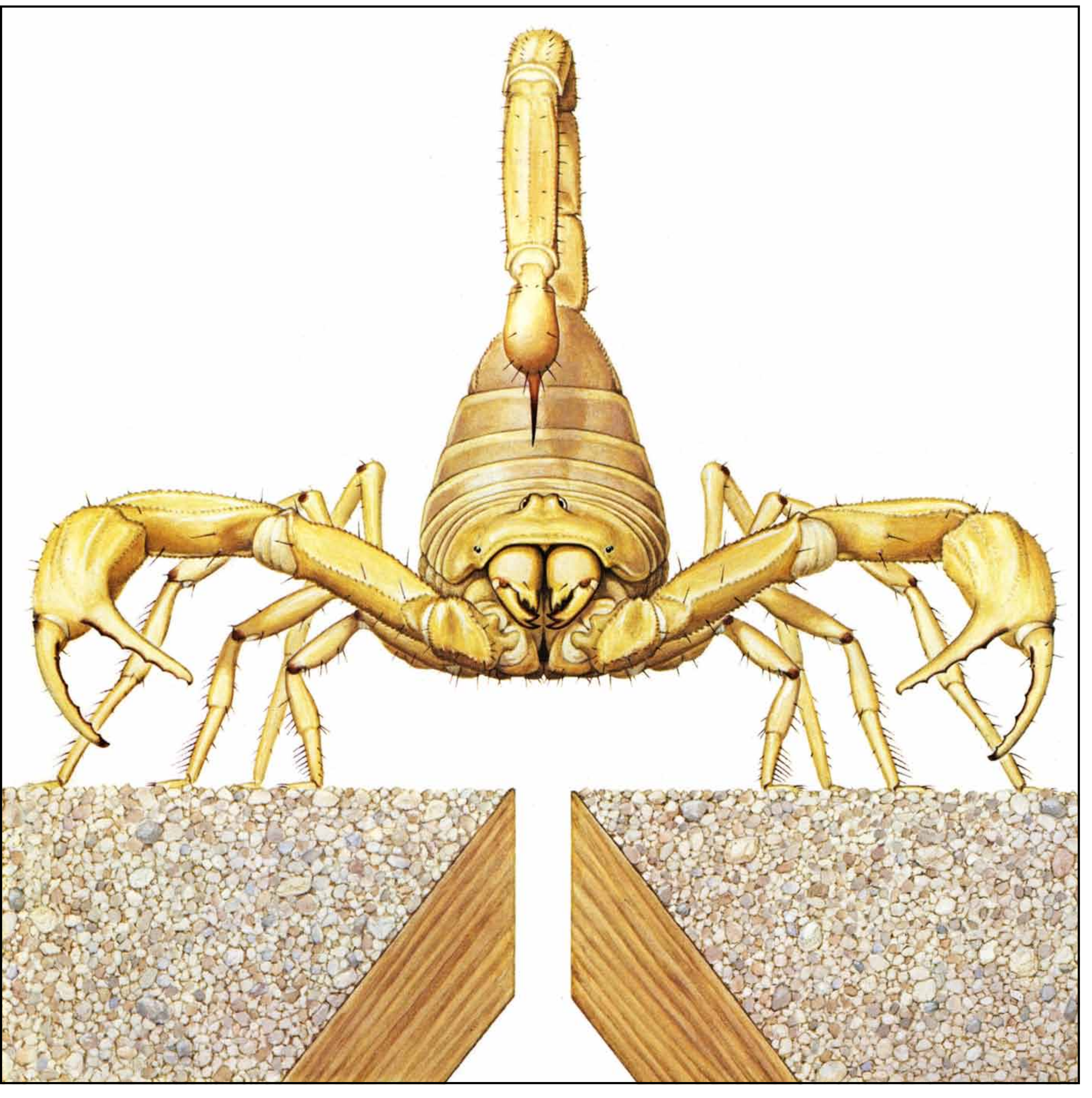
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



DETECCION DE PRESAS POR EL ESCORPION

Febrero 1985

350 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 101
Febrero 1985

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

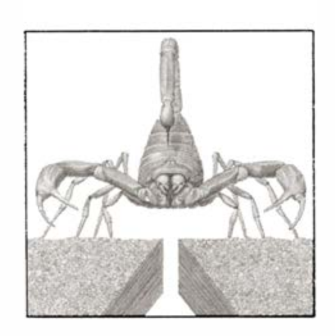
Amando García Rodríguez: *Memoria atómica* y *Reproducción digital del sonido*; Jaume Baguñá: *Reconocimiento mutuo entre neuronas embrionarias*; Joandomènec Ros: *Detección de la presa en el escorpión de la arena*; José Miguel Calvo Hernández y Juan F. Vilchez Bartolomé: *El pozo más profundo del mundo*; Natividad Sánchez Sainz-Trapaga: *Rotación mental de los objetos*; Laureano Carbonell Relat: *El navío de línea español*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Josep Gallart y Carlos Pérez

Libros:

Antonio Argandoña, José Font, Manuel García Velarde y Francisco Aragón de la Cruz



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra un escorpión de la arena, *Paruroctonus mesaensis*, un habitante nocturno del desierto de Mojave meridional. Aparece aquí en una caja de arena de laboratorio, en el contexto de un experimento que demostró su sensibilidad a minúsculas vibraciones del sustrato (véase "Detección de la presa en el escorpión de la arena", por Philip H. Brownell, en este mismo número). Cuando se le amenaza, el animal adopta una postura ofensiva, elevando la porción posterior del cuerpo y arqueando su aguijón por encima de la cabeza, al tiempo que se sitúa en la dirección en que percibe la amenaza. La ranura bloquea la transmisión de ondas mecánicas a través de la arena, pero no interfiere las señales auditivas o visuales. Se comprobó que el animal giraba hacia el estímulo amenazador sólo si sus patas tocaban el sustrato estimulado. El escorpión utilizaba asimismo las vibraciones del suelo para localizar a la presa, a la que agarraba con sus pedipalpos y paralizaba con el aguijón.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 3850 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Tom Prentiss

Página	Fuente
9-11	J. Sánchez Rodríguez (Instituto Nacional de Meteorología)
12-17	Magda Mària y J. Sánchez Rodríguez
19	Jon Brenneis
20-26	Andrew Christie
29	Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani, Universidad de Stanford
30	Keir G. Pearson y John D. Steeves (*arriba*); Keir G. Pearson (*abajo*)
31	Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani (*arriba*), Carol Donner (*abajo*)
32	Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani
33	Carol Donner (*arriba*), Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani (*abajo*)
34	Carol Donner
35	Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani
36	Ilil Arbel
37	Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani
41-42	J. Cotoner y J. Gallart
45	Quesada/Burke (*arriba*); John Monforte, Universidad de Miami (*abajo*)
46	Hank Iken, Walken Graphics
47	John Monforte, Universidad de Miami (*arriba*); Hank Iken, Walken Graphics (*abajo*)
48-51	Hank Iken, Walken Graphics
53	Alfred Owczarzak, Universidad estatal de Oregon
54	Alfred Owczarzak, Universidad estatal de Oregon (*arriba*); Sally Black (*abajo*)
55	Tom Prentiss
56	Sally Black
57	Tom Prentiss
58	Sally Black
59-60	Tom Prentiss
63	A. A. Chumichev
64	A. A. Chumichev (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
66-69	Ilil Arbel
70	Roger N. Shepard, Universidad de Stanford
71-77	Alan D. Iselin
79	Museo Naval, Madrid
80-85	Allen Beechel
89-93	Hank Iken, Walken Graphics
95	Robert E. Apfel
96-98	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

J. SANCHEZ RODRIGUEZ ("Satélites meteorológicos") es profesor de física y termodinámica y termotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid. Graduado en ciencias físicas por la Universidad de Madrid, donde recibió su grado de doctor en 1961 con una tesis sobre el alcance y la validez del análisis dimensional en la teoría de turbomáquinas. Trabajó durante siete años en la industria privada en Bilbao y Madrid, registrando diversas patentes. El análisis dimensional aplicado a la sistematización de fórmulas en problemas de mecánica de fluidos y termotecnia ha sido también objeto de su interés, plasmado en varios trabajos publicados casi todos por la Real Sociedad de Física y Química. Ha escrito varios libros sobre física, termodinámica y termotecnia y turbomáquinas. Su contribución organizadora y de introducción de las modernas técnicas en la meteorología la está desarrollando en el actual Instituto Nacional de Meteorología desde 1970 y con una mayor intensidad en los últimos tres años, dedicados a la planificación de la estructura del equipamiento meteorológico español.

RICHARD G. BREWER y ERWIN L. HAHN ("Memoria atómica") son, respectivamente, becario de la IBM en el Laboratorio de Investigación de esa compañía en San José, California, y profesor de física de la Universidad de California en Berkeley. Brewer, que también enseña física en la Universidad de Stanford, estudió en el Instituto de Tecnología de California y en la Universidad de Berkeley, que lo doctoró en 1958. Ha impartido clases en la Universidad de Harvard y en la de California en Los Angeles. Pertenece a la Academia de Ciencias de los Estados Unidos. Su trabajo de investigación, por el que obtuvo la medalla A. A. Michelson del Instituto Franklin en 1979, se centra en la física del láser y la espectroscopía. Hahn cursó la licenciatura en el Juniata College, doctorándose por la Universidad de Illinois en 1949. En 1952, tras un período de trabajo postdoctoral en Illinois y en Stanford, se incorporó al Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM. Berkeley lo contrató en 1955. Es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos.

COREY S. GOODMAN y MICHAEL J. BASTIANI ("Reconocimiento mutuo entre neuronas embrionarias") son neurobiólogos del desarrollo que trabajan conjuntamente desde 1981. Goodman es profesor adjunto de biología de la Universidad de Stanford, donde se formó, si bien el doctorado se lo concedió la Universidad de California en Berkeley en 1977. Tras dos años de investigar las propiedades de las neuronas embrionarias en la Universidad de California en San Diego se incorporó al claustro de la Facultad de Biología de Stanford. Bastiani es el decano de los investigadores del laboratorio de Goodman. Estudió en San Diego, recibiéndose de doctor por la Universidad de California en Davis.

JOHN MONFORTE ("Reproducción digital del sonido") dicta un curso de tecnología e ingeniería de la música en la Universidad de Miami, en la que desempeña también el cargo de director de los servicios de grabación. Tras licenciarse en ingeniería eléctrica por la Universidad de Michigan, en 1977, trabajó en el diseño de circuitos en la empresa ADM Technology, Inc., dedicada a la fabricación de equipos profesionales de audio. En 1979 regresó a la Universidad de Michigan. En su calidad de técnico electrónico se ocupó de las instalaciones de grabación de la universidad y registró las actuaciones de los conjuntos musicales del centro.

PHILIP H. BROWNELL ("Detección de la presa en el escorpión de la arena") enseña en el departamento de zoología de la Universidad estatal de Oregon en Corvallis, en calidad de profesor adjunto. Estudió en la Universidad de California en Berkeley, por la que se licenció en 1970, y en la Universidad de California en Riverside, que le otorgó el doctorado en 1975. En sus estudios postdoctorales en la Universidad de California en San Francisco investigó el sistema nervioso de los moluscos y los mecanismos celulares responsables de su comportamiento a largo plazo, línea de investigación que prosigue en Oregon. Se interesa también Brownell por los sistemas sensoriales de los artrópodos y su comportamiento, que, junto con su pasión por los desiertos, le llevaron a estudiar el escorpión de la arena.

YE. A. KOZLOVSKY ("El pozo más profundo del mundo") es ministro de geología de la Unión Soviética. Profesor y doctor en ciencias técnicas, ha enseñado geología económica y ha explorado los principales yacimientos minerales de la Unión Soviética. En 1965 accedió a la jefatura del departamento técnico del ministerio de geología soviético, siendo, más tarde, nombrado director de la Unión General de Institutos de Investigación de Recursos Minerales y Exploración Geológica. En 1975 pasó a ocupar su actual cargo. Kozlovsky dirige la monumental *Enciclopedia Minera* de la Unión Soviética, así como el programa ruso de investigación de perforaciones superprofundas.

LYNN A. COOPER y ROGER N. SHEPARD ("Rotación mental de los objetos") son psicólogos experimentales que han colaborado ampliamente en el estudio de las imágenes mentales. Cooper enseña psicología en la Universidad de Pittsburg y colabora en sus centros de investigación sobre el aprendizaje y desarrollo y de filosofía de la ciencia. Concluidos sus estudios de licenciatura en la Universidad de Michigan, se doctoró por la Universidad de Stanford en 1973. Ha sido galardonada con el premio Científico Distinguido de la Asociación Americana de Psicología. Shepard enseña psicología en Stanford. Licenciado por esa misma institución en 1951, se doctoró por la de Yale en 1955. En 1968 volvió a Stanford contratado para el claustro docente. Ha recibido numerosas menciones y distinciones honoríficas, entre las que se cuenta el premio a la Contribución Científica Distinguida de la Asociación Americana de Psicología; es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos. Shepard y Cooper iniciaron su colaboración siendo la primera estudiante en Stanford.

JOHN D. HARBRON ("El navío de línea español") es analista de política exterior del Thomson Newspaper Group, de Canadá, y siente una gran inclinación por la mar y los barcos. Tras licenciarse en la Universidad de Toronto y realizar algunos trabajos de investigación en la Universidad de La Habana ingresó en la Real Marina canadiense. Ya oficial, fue profesor de historia de la marina en el Colegio Naval Canadiense de Royal Roads, Columbia Británica. Al retirarse colaboró con varias revistas norteamericanas, canadienses y británicas y posteriormente ingresó en el Thomson Group. Harbron posee varias condecoraciones, entre ellas la española de comendador de la Orden de Isabel la Católica.

Hace...

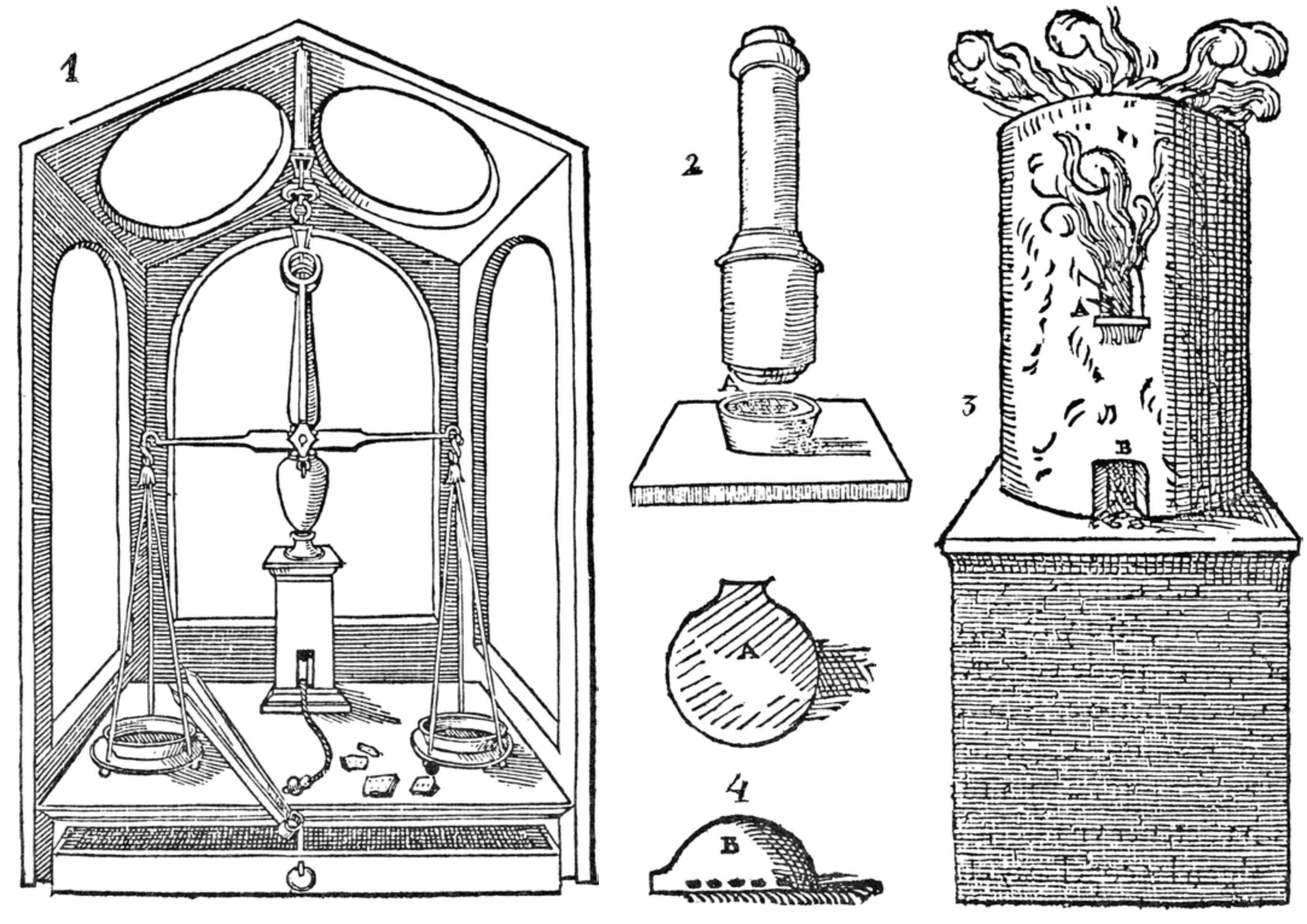
José M.ª López Piñero

... cuatrocientos cincuenta años

Nació en León Juan de Arfe y Villafañe, generalmente recordado como "escultor de oro y plata" y artífice de las custodias de las catedrales de Avila, Valladolid y Sevilla. Su condición de artista fue, sin embargo, inseparable de la de técnico, conforme a los patrones propios de la época. Hijo del famoso orfebre Antonio de Arfe y nieto del alemán Enrique del Arfe, fundador en España de la dinastía, su vida transcurrió en Valladolid, Sevilla, Segovia y Madrid. Falleció en esta última ciudad en 1603.

Arfe realizó aportaciones de interés en distintos campos científicos y técnicos, de todas las cuales destaca la correspondiente a la técnica de los ensayadores. Durante el siglo XVI, el ensayo de minerales y de metales pasó a primer plano, no solamente a causa de las exigencias planteadas por la explotación minera, sino por la necesidad de aplicar técnicas rigurosas a la determinación de la ley de las monedas. Como es sabido, España fue durante esta centuria un gran centro de acuñación de moneda, por lo que no resulta extraño que los puestos de ensayador en las cecas fueran adquiriendo una importancia cada vez mayor. Felipe II intentó incluso reglamentar su actividad y normalizar sus criterios a través de la junta de ensayadores por él convocada en 1585, que hay que considerar como un esfuerzo paralelo al que dicho monarca dedicó a las demás ocupaciones y profesiones relacionadas con la ciencia. Por otra parte, conviene recordar que el ensayo era entonces uno de los terrenos más fértiles para el desarrollo de métodos precisos. "En el siglo XVI –afirman C. Stanley y J. Forbes– no hubo campo alguno de la ciencia aplicada más avanzado que la técnica de los ensayadores. Gracias a siglos de experimentación puramente empírica, se habían desarrollado métodos de análisis cuantitativo cuando las circunstancias lo justificaban económicamente".

Este es el contexto en el que hay que situar la obra de Arfe titulada *Quilatador de la plata, oro y piedras*, cuya primera edición apareció en Valladolid en 1572. Fue la primera monografía sobre el tema publicada en Europa, ya que con anterioridad solamente lo habían hecho las toscas referencias contenidas en las cartillas llamadas *Probierbüchlein* y los capítulos consagrados a la materia en los tratados generales de Bi-



*1. Instrumental utilizado por Juan de Arfe para ensayar la plata: balanza (**1**), copela (**2**), hornillo (**3**) y esquema de la mufla del hornillo (**4**)*

ringuccio y Agricola. La *Beschreibung* de Ercker, gran hito en la historia del ensayo, apareció algo más tarde (1574). Portela considera la obra de Arfe "un manual práctico escrito por un técnico" y subraya su originalidad y su estricto atenimiento a la experiencia. Está dividida en tres libros, dedicados sucesivamente a la plata, el oro y las piedras preciosas. Entre otras cosas, se ocupa con detenimiento de las unidades de peso y sus equivalencias, así como de todos los instrumentos utilizados por los ensayadores y ofrece una descripción clara y minuciosa del proceso analítico aplicado a la plata y al oro. La exposición tiene un estilo directo, sin carga alguna de erudición libresca e intenta únicamente dar a conocer los métodos que el autor había comprobado que eran más rápidos y exactos; va acompañada, además, de numerosas figuras.

"Para ensayar la plata –dice Arfe, por ejemplo– háse de tener juntamente un peso muy sutil y justo, tanto que con cualquier cosa, por mínima que sea, haga conoscimiento. Y este ha de estar en su guindaleta (jarcia) y metido en una caja guarnescida de papel o de vidrio, para que el aire y el resuello no toque las balanzas, porque en cosas sutiles muy poca cantidad hace mucho, y podría haber en el ensayo notable yerro si no se mira mucho. Y juntamente se han de tener dos cazoletas de plata pequeñas y de igual peso, para poner en las balanzas; y en la una poner las pesas y en la otra la plata que se mete a ensayar, cuyo peso y cazoletas son de esta manera (fig. 1). Hánse de tener también hechas las copelas, las cuales se hacen de diferentes maneras de ceniza, porque unos las hacen de cenizas de sarmientos, o de retama mezclada con cuernos de carnero quemados y molidos; otros también las hacen de ceniza de tronchos de berzas, pero tiénese por mejor la que es de solos huesos de canillas de vaca y de carnero, tanto de unos como de otros, muy bien quemados, de manera que queden blancos. Y éstos molidos y muy cernidos témplense con agua en que se haya desatado un poco de cal viva; y no se ha de echar más agua de cuanto se pegue la ceniza apretándola. Hecha la ceniza, se ha de echar en un molde de bronce, hecho a manera de pesa de dos onzas de marco; y este molde no ha de tener suelo y como esté lleno, pónese encima otro molde de latón (como se muestra en la figura 2), el cual ha de estar muy liso en la parte señalada A, que es lo que se asienta sobre la ceniza; y dánse encima dos otros golpes de martillo hasta que



2. Ensayador colocando una copela en la boca superior del hornillo. A sus espaldas aparece la balanza. Los cinco grabados proceden de la primera edición (1585) del **Quilatador de la plata, oro y piedras**, *de Juan de Arfe.*

esté bien apretada. Después de lo cual se saca del molde y háse de tener hechas muchas de estas copelas, porque son mejores añejas que recién hechas y siempre se meten en el hornillo tres o cuatro, para que estén calientes y bien enjutas.

"El hornillo del ensaye se hace su armadura sobre barras de hierro y el suelo es de parrillas y muy llano. Después se guarnece de barro arenoso por dentro y fuera, de manera que todo el hierro quede cubierto, salvo el suelo, y tiene de diámetro en el hueco un palmo y de alto, dos palmos. Será redondo, como se muestra en la figura 3, y junto al suelo de las parrillas ha de tener una boca A por donde entren y salgan las copelas; y abajo, otra boca B por donde salen las centellas y ceniza. Y sobre las parrillas del suelo ha de estar asentado un ladrillo para poner encima la mufla; y ponerse sobre un banco, para que la boca del hornillo esté al nivel de la vista. La mufla ha de ser a talle de media olla, cerrada por todos lados, con una sola boca en el cuello, por donde entren y salgan las copelas. Ha de tener de diámetro cuatro dedos menos que el hornillo, para que, asentada sobre el ladrillo que está dentro, haya entre ella y el hornillo dos dedos de espacio en la circunferencia para la entrada del calor. Este suelo ha de ser llano como la figura 4A, que es la planta, y en la orilla que está sobre el dicho suelo ha de tener unos agujeros para que entre el calor y claridad, como se muestra en la figura 4B, y de aquella manera ha de estar asentada muy llana sobre el ladrillo, que se ha dicho que ha de estar sobre las parrillas del suelo del hornillo. Y el hornillo, con la mufla asentada, ha de estar encendido con carbón de pino, porque gasta menos que el de brezo; y la copela ha de estar caliente y metida en el hornillo, sobre el suelo de la mufla."

Además de la primera edición de 1572, Arfe publicó otra versión más amplia del *Quilatador* en 1598. Como dice Bonet Correa, "más que dos ediciones de la misma obra, se trata de dos obras diferentes: la primera un libro didáctico, con lo esencial del oficio y el catálogo de materias, y la segunda un manual o ayuda memoria para uso de oficiales y maestros dedicados al ensayo de metales". Ambas versiones se reimprimieron juntas en un solo volumen un siglo más tarde.

Arfe fue, por supuesto, la principal figura de la junta de ensayadores que, como hemos dicho, convocó Felipe II en 1585. Como hombre de confianza de la corona ocupó durante el último decenio de su vida el cargo de ensayador de la importante ceca de Segovia.

Otro aspecto notable de la actividad de Arfe relacionada con la ciencia y la técnica es el libro *De varia commesuración para la Esculptura y Arquitectura*, que publicó en 1585, fecha que constituye un segundo motivo de que recordemos aquí al artista leonés. Esta segunda obra es una enciclopedia escolar de los conocimientos científicos que Arfe consideraba necesarios para los orfebres y los artistas en general. Incluye cuatro "libros", cada uno con portada propia. El primero está dividido en dos partes, dedicada una a la geometría, que "de todas las cosas que se requieren en el arte de labrar plata y oro, es la primera y más principal"; y la otra, a los conocimientos astronómicos básicos "para hacer los relojes (de sol) que suelen hacerse de oro y plata, que son los horizontales, cilindros y anulares". El segundo libro es un tratado de anatomía humana para artistas, disciplina en la que Arfe se había formado junto a Cosme de Medina, catedrático de anatomía de Salamanca y discípulo de Luis Collado, cabeza del movimiento vesaliano español: "Después que para la demostración de los huesos hubimos hecho toda la diligencia dicha, nos pareció era razonable cosa de ver hacer anatomía en algunos cuerpos: y así nos fuimos a Salamanca donde a la sazón se hacía por un catedrático de aquella Universidad que llamaban el Dr. Cosme de Medina y vimos desollar por las partes del cuerpo algunos hombres y mujeres ajusticiados y pobres". El tercero y cuarto libros, de menor interés que los anteriores, tratan, respectivamente, "de las alturas y formas de los animales (cuadrúpedos) y aves" y "de la arquitectura y proporción de las piezas de iglesia".

El texto va acompañado de tres centenares de figuras y el contenido de cada capítulo se resume o glosa en verso, en octavas reales, recurso nemotécnico habitual en los manuales didácticos de la época. Por ejemplo, el dedicado al cuadrante astronómico dice:

"El cuadrante es la guía principal
para hacer los relojes que el Sol rige.
En él verá la altura cada cual
que desde el horizonte se colige.
Deste sale la línea vertical
donde el cuarto del círculo se elige
y muéstranos por línea aquella estrella
que no se puede navegar sin ella".

De varia commesuración fue reimpresa en 1675 y tuvo, además, cinco reediciones entre 1736 y 1802, aunque con grandes modificaciones del texto y los grabados originales de Arfe.

Satélites meteorológicos

Estado actual de la técnica de los satélites meteorológicos y de los sistemas de difusión y utilización de sus datos, con la valoración del impacto económico que representan en la meteorología aplicada

J. Sánchez Rodríguez

Cuando el locutor de una emisora radiofónica dice la temperatura u otras características del tiempo que hace en un lugar geográfico estamos asistiendo a la primera fase de cualquier proceso meteorológico. Necesitamos la observación atmosférica en numerosos puntos de la superficie de la Tierra para recoger la temperatura del aire, humedad, viento, presión y otros datos cuya síntesis levantará el mapa meteorológico. El observatorio deberá ser representativo de una comarca, por lo que ha de cumplir ciertas normas que eliminan los lugares con valores excesivamente circunscritos de las variables meteorológicas. Lo que interesa son los valores de temperatura, humedad o punto de formación de rocío por enfriamiento, dirección y velocidad del viento medio y otros, a distintos niveles sobre la estación observadora que escudriña o sondea la atmósfera en profundidad.

El meteorólogo operativo de los primeros tiempos resumía las observaciones en mapas sinópticos. Con sus conocimientos científicos y prácticos procuraba prever las situaciones atmosféricas, apreciadas en su evolución y movimiento, en el transcurrir del tiempo horario, incluso para varias fechas sucesivas. Vino después, no hace muchas decenas de años, otro procedimiento, el de la predicción numérica. En esencia se basaba en las ecuaciones fundamentales de la dinámica de los fluidos constitutivos de la atmósfera para procurar la integración lo más aproximada posible de estas ecuaciones, a partir del conocimiento de las variables atmosféricas en un instante determinado, inicial; con estos valores se confeccionaban mapas de horas o días posteriores. Se echaba en falta la disponibilidad de suficientes datos sobre los mares y zonas inhóspitas, especialmente.

La predicción numérica vio allanado su camino con los dispositivos de cálculo automático y su uso de los ordenadores de mayor capacidad y velocidad de computación. Al propio tiempo, sirvió para denunciar las insuficiencias de información básica en muchas zonas del planeta. A llenar las lagunas de información meteorológica se dedicaron sistemas especiales, como las estaciones automáticas en tierra, las boyas para observación y recogida de datos oceanográficos a la vez que meteorológicos, los equipos automáticos de observación a bordo de aviones, cohetes meteorológicos, etcétera. Y, sobre todo, la inmensa posibilidad de observar el tiempo desde el espacio exterior por medio de satélites artificiales terrestres.

Los satélites meteorológicos entran en funcionamiento en 1960. Están dotados de cámaras para observar la superficie de nuestro planeta en distintas longitudes de onda, como en cierto modo hace el muchacho que utilizando, por ejemplo, un filtro de color amarillo, deja pasar sólo la radiación de esa longitud de onda correspondiente al color amarillo. Las imágenes recibidas por las cámaras instaladas en los satélites son analizadas y medida su intensidad en cada uno de los puntos de una retícula imaginaria constitutiva de cada toma, al igual que la imagen transmitida por una emisora de televisión, para luego ser presentada en una pantalla u otro medio, en estaciones receptoras de nuestro planeta.

La información cifrada en la que el satélite resume automáticamente la imagen observada de parte de nuestra superficie planetaria, con nubes, contornos costeros, hielos y nieves, tormentas de arena y demás es difundida por las antenas del satélite. Esta transmisión directa llega a receptores dotados de equipos de ordenación, grabación y reproducción instalados en determinados centros de tratamiento. Estos procesan la información recibida desde los satélites meteorológicos para prepararla y reducirla en formato suficiente para usuarios más modestos.

Según sus órbitas, los satélites meteorológicos se clasifican en dos grandes grupos: geoestacionarios y de órbita polar. Un satélite geoestacionario permanece prácticamente inmóvil en relación con un observador terrestre inmóvil en el planeta; desde el satélite se ve siempre la misma zona terrestre. Se consigue colocándolo a una altitud en que el período de la órbita, o duración de cada vuelta, sea de 24 horas. De aquí el calificativo de geosíncrono o de período idéntico o sincrónico con el de la rotación terrestre. Los satélites de órbita polar están situados, por contra, a menor distancia; de unos 800 a 1000 kilómetros, en vez de los 36.000 kilómetros que vienen a distar los geoestacionarios. Los de órbita polar utilizan órbitas que forman un ángulo próximo a los 90 grados con el plano ecuatorial, pasando cerca de los polos Norte y Sur. La duración de cada órbita es de algo más de 100 minutos; a causa de la rotación propia de la Tierra, cada órbita cruza a unos 25 grados de longitud más al oeste que la anterior.

Uno de los principales acuerdos del Proyecto de Investigación Global Atmosférica, tendente a mejorar la cobertura de observaciones en nuestra atmósfera, fue el de situar cinco satélites geoestacionarios en órbita ecuatorial, sincrónica con la rotación terrestre. Para esta misión, hasta ahora han proporcionado satélites meteorológicos los siguientes grupos: Europa con dos satélites Meteosat (el segundo para reemplazar al primero que estaba averiado), Japón con el GMS, la Unión Soviética, que pondrá en órbita el GOMS cerca del que hoy ya utiliza la India, y los Estados Unidos, que cubre dos posiciones en ese cinturón de cinco satélites antes señalado. Además de estos geoestacionarios son numerosísimos los satélites

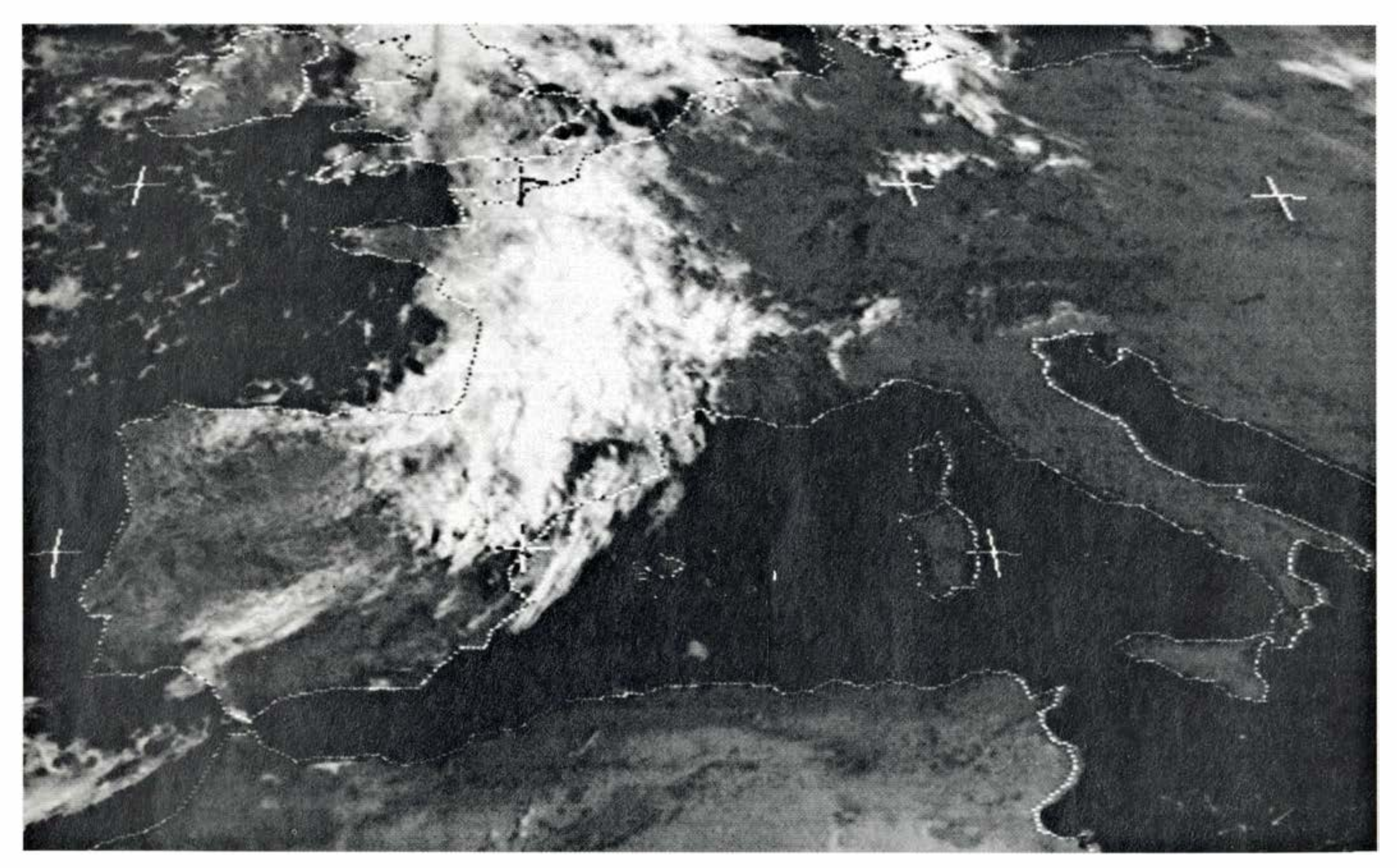
orbitales meteorológicos que han lanzado, casi exclusivamente, la Unión Soviética y Estados Unidos. Baste decir que Norteamérica ha alcanzado la cincuentena sólo entre 1960 y 1980, siendo de ellos 23 de carácter investigador, otros 23 operativos y el resto con ambas características.

La vigilancia meteorológica mundial y con ella el servicio de alarma y protección civil frente a catástrofes recibió un poderoso impulso con la coordinación, mediante programaciones informáticas, de los datos de satélites, de redes de radar y de las propias observaciones terrestres y aerológicas de observatorios sinópticos automáticos o semiautomáticos. En caso necesario, los servicios o instituciones meteorológicas emiten los avisos preventivos para la población o para determinados sectores: aviación, agricultura, marina, transportes, comercio y otros. Pensemos, por ejemplo, en las implicaciones que olas de calor o frío suponen para servicios muy diversos de la actividad económica. Nuestros transportes de frutas por el invierno europeo, en recorridos largos o medios no muy rápidos, deben ser acompañados de una asesoría meteorológica para decidir, anticipadamente, las fechas más convenientes y la madurez recomendada en la fruta exportada. En otro ejemplo, una ola de calor puede suponer un incrementado y previsible consumo de helados, bebidas, hielo, etcétera. En agricultura son numerosas las tareas en que habrá que tomar una decisión: recolección, siembra otoñal más o menos aplazada, utilización de variedades de semilla de ciclo corto o largo, venta o retención de excedentes de granos u otros productos, sacrificio o engorde de ganado joven y un sinfín de problemas más.

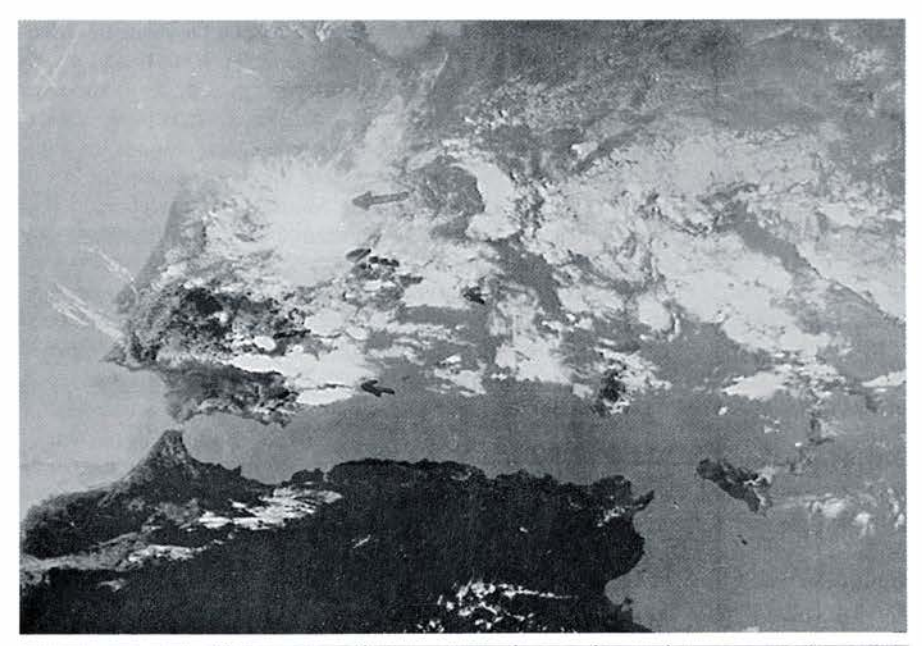
Las crecidas incontroladas de ríos o la súbita inundación de ramblas, sin suficientes presas y pantanos de regulación, ocasionadas por temporales de lluvias persistentes o por fusión demasiado rápida de las nieves de las montañas de cabecera de las respectivas cuencas, deben constituir un objetivo de previsión y en cuya preinformación correcta contribuirán los datos de satélites y los de redes de radar meteorológico. Los huracanes, tornados, trombas y fuertes tormentas tropicales son los fenómenos de mayor dramatismo meteorológico. Los datos conseguidos por los satélites geoestacionarios, ayudados por los resultantes de medidas más directas desde aviones de reconocimiento, permiten la detección eficaz y oportuna de estos sistemas de flujo superior en mesoescala. Programas perfeccionados de ordenador determinan las temperaturas con precisión de un grado y el campo de vientos en superficie, salvo en la chimenea de las tormentas, con una precisión del 10 por ciento.

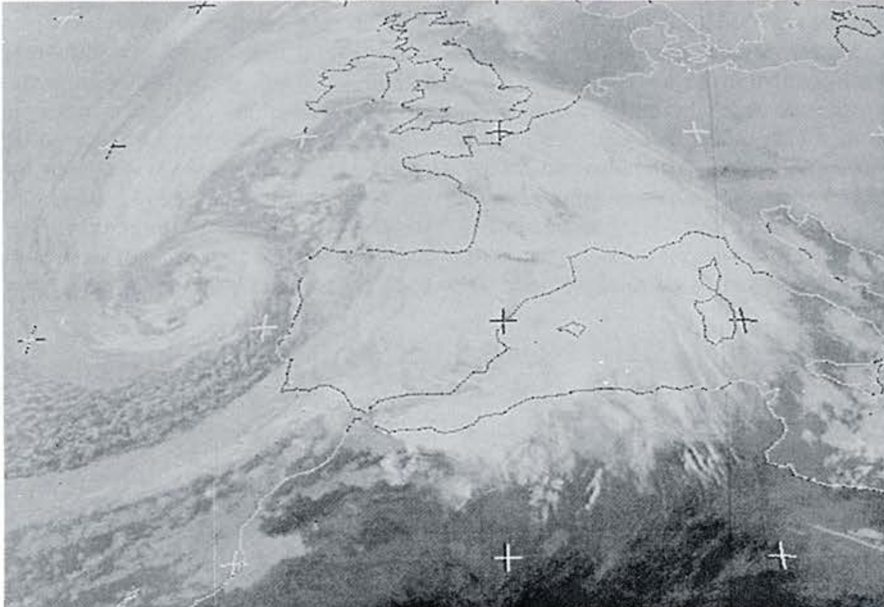
Se han depositado grandes esperanzas en la aplicación de los datos de satélites meteorológicos a la modificación artificial del tiempo. Una buena determinación, en situación e intensidad y movimiento de los núcleos importantes en los bancos de humedad de las capas bajas y medias de la atmósfera, ayudará mucho para los avisos de situaciones propicias a la propagación violenta de incendios en bosques.

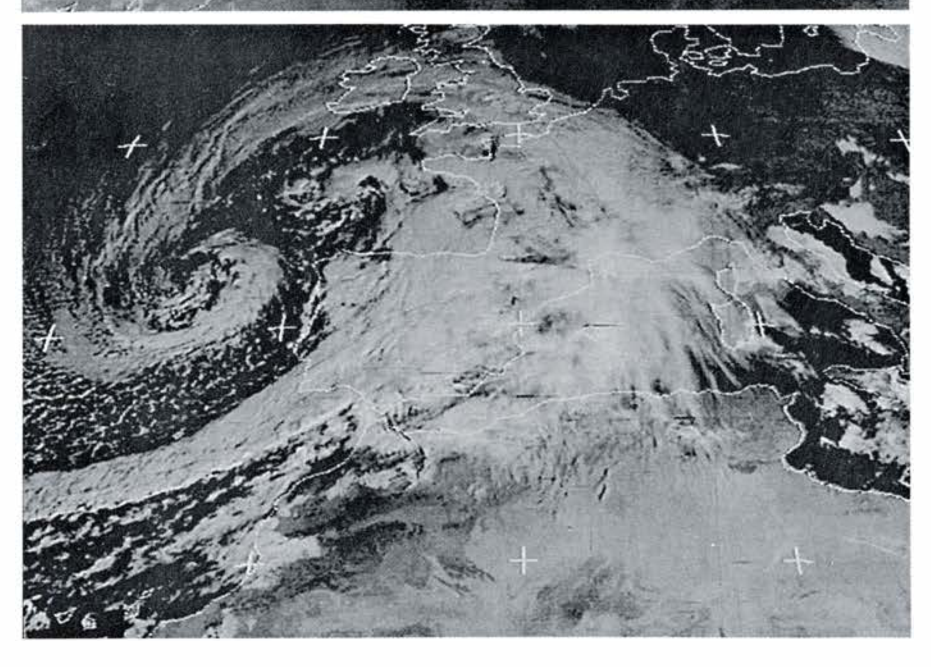
Existe una tendencia en los países occidentales a cargar los gastos de operatividad de satélites meteorológicos sobre los sectores supuestamente más beneficiados por la mejora de información y predicción. En este sentido la Agencia Espacial Europea encargó un estudio del provecho que extraían los distintos sectores. Se llegó a los siguientes porcentajes correspondientes a Europa: agricultura, 0,75; construcción, 0,49; transporte, 0,48; agua, gas y elec-



1. FOTOGRAFIA TOMADA POR EL METEOSAT-2 en el intervalo de luz visible el 31 de julio de 1984 a primeras horas de la mañana. Una penetración fría por el Noroeste peninsular rompe una racha de temperaturas altas con precipitaciones importantes en las zonas cubiertas por la masa nubosa.







tricidad, 0,18; comercio, 0,03; industria, 0,2; servicios sociales 0,03; minería y canteras, 0,01.

La predicción meteorológica mejora con el número y calidad de los datos, el perfeccionamiento de los métodos de predicción, el ajuste mejorado de los modelos numéricos utilizados en los ordenadores y un conocimiento más hondo de los fenómenos atmosféricos. Los satélites proporcionan datos de temperatura, humedad, viento, a distintos niveles sobre cualquier punto de la superficie explorada desde el exterior. Se sustituye así al sondeo aerológico que desde la superficie terrestre obtuviera esos datos en cada punto de la misma. Este sondeo aerológico se logra por una "estación de observación automática", que transmite las medidas mediante unas señales o modulaciones de la emisión de una diminuta emisora montada, como la propia estación de observación, en un globo dotado de suficiente fuerza ascensional y libre en la atmósfera, sobre la estación de tierra que lo lanzó utilizando hidrógeno o helio como gas más ligero que el aire. El satélite puede simular este sondeo en cuantos puntos se quiera y por inhóspita o deshabitada que sea la comarca en que se le pide la realización de esta función.

Pero el satélite no puede colocar un

2. COMPOSICION FOTOGRAFICA con datos radiométricos en el infrarrojo, IRI, captados por el satélite meteorológico TIROS NOAA-7, el 26 de agosto de 1983, entre las 14.19 y las 14.31 horas del meridiano de Greenwich (*arriba*). La escala de grises correspondiente indica la traducción de intensidades en gamas de grises desde el blanco, asignado a las cimas nubosas más altas, y por tanto, más frías, hasta el negro, asignado a las tierras más calientes, las africanas, Extremadura, parte de Andalucía, que están despejadas. La observación del satélite se corresponde con la segunda oleada de lluvias torrenciales de las tres que dieron lugar a inundaciones en el País Vasco. Las flechas señalan la perturbación principal y también otras zonas con fuertes nubes de gran desarrollo, cúmulonimbos, que dieron lugar aquel día a importantes perturbaciones. La fotografía central y la inferior realizadas en el mismo día (7 de noviembre de 1982) corresponden a datos en dos canales de observación por el satélite Meteosat 2, situado a unos 36.000 kilómetros sobre el golfo de Guinea. El encuadramiento es el mismo en ambas composiciones, permitiendo apreciar claramente la situación meteorológica sobre la Península Ibérica y Baleares. Una corresponde al canal de infrarrojo y la otra al visible, siendo las horas de observación las primeras de la mañana y una diferencia de media hora entre ambas, lo que les hace prácticamente isocronas. La fecha corresponde a la de las inundaciones en el Pirineo provocadas por un intenso y extenso sistema frontal que cruza en banda la Península, apreciándose también la profunda depresión atlántica al que está asociado, delatada por la espiral nubosa al oeste de Portugal que enlaza con el frente sobre España a través de Gran Bretaña.

termómetro para medir la temperatura, un higrómetro para la humedad, una veleta anemométrica para medir el viento, etcétera, en cada punto de la atmósfera terrestre indagado. Toma medidas indirectas. Con un programa de cálculo deduce los valores buscados de temperatura, humedad, viento y demás. El mensajero que porta en sí mismo la medida indirecta que necesitamos es la luz, o con más generalidad la radiación electromagnética en varias partes de su diversidad o espectro. La luz visible, la que es capaz de excitar informativamente a nuestro cerebro, es sólo una fracción de la "luz" que se utiliza en los órganos receptores del satélite, que son las cámaras radiométricas; éstas no sólo "ven" el espectro óptico, como nuestros ojos, sino otras partes del espectro de ondas electromagnéticas, producido directamente en parte y en parte reflejado de la radiación solar en el objeto o zona, incluso gaseosa, como las de la atmósfera, que están enfocando aquellas cámaras radiométricas. La radiación se modifica en el camino, desde la zona o lugar explorados hasta el receptor, satélite en este caso. De acuerdo con el espectro "luminoso" recibido de cada zona, el ordenador reconstruye el valor de partida y la temperatura, humedad, etcétera, de las zonas atravesadas en su camino por la radiación en la atmósfera. Una oportuna selección de regiones en el espectro, mediante filtros adecuados, podrá elegir así como base de cálculo las medidas de intensidad en la región o intervalo visible del espectro, en la ultravioleta, en la infrarroja próxima o en la de ondas centimétricas.

Las medidas de temperatura y humedad de la atmósfera a distintas alturas o niveles con determinada presión, y para cada lugar, así como la medida de las temperaturas superficiales de las aguas del mar, se consiguen mediante los satélites de órbita polar, o mejor, casi polar. Los vientos se deducen de los movimientos de nubes observadas en las fotografías.

La radiación solar es reflejada en parte por la superficie terrestre (tierra, mar, hielo y nieve) y en parte por las nubes; esta radiación reflejada, como la difundida por las gotas de agua de las nubes, o en los aerosoles o partículas en suspensión en la atmósfera, son modificadas por absorciones en la atmósfera gaseosa que atraviesan. Recuérdese, asimismo, que los cuerpos radian según su temperatura, radiaciones que sufren distinta suerte a su paso por la



3. INTERVALO ESPECTRAL VISIBLE, esto es, un simil fotográfico de hipotética observación visual, con el convenio de que las cimas nubosas más altas sean las de tono más blanco. El mar y las tierras oscuras no permiten distinguir los contornos de las costas que han sido sobrepuestos mediante programa de ordenador, al igual que los puntos *(cruces)* de latitudes y longitudes cero: decenas de grados. El meridiano de Greenwich, de longitud cero, pasa aproximadamente por la desembocadura del Ebro. Esta estructura nubosa más densa en el Levante español originó fuertes inundaciones allí en la madrugada del 20 de octubre de 1982. Resulta muy neta la descripción de la circulación, en la gota de aire frío superior, aproximadamente centrada sobre Gibraltar, y que se define por la alineación de las trazas nubosas.

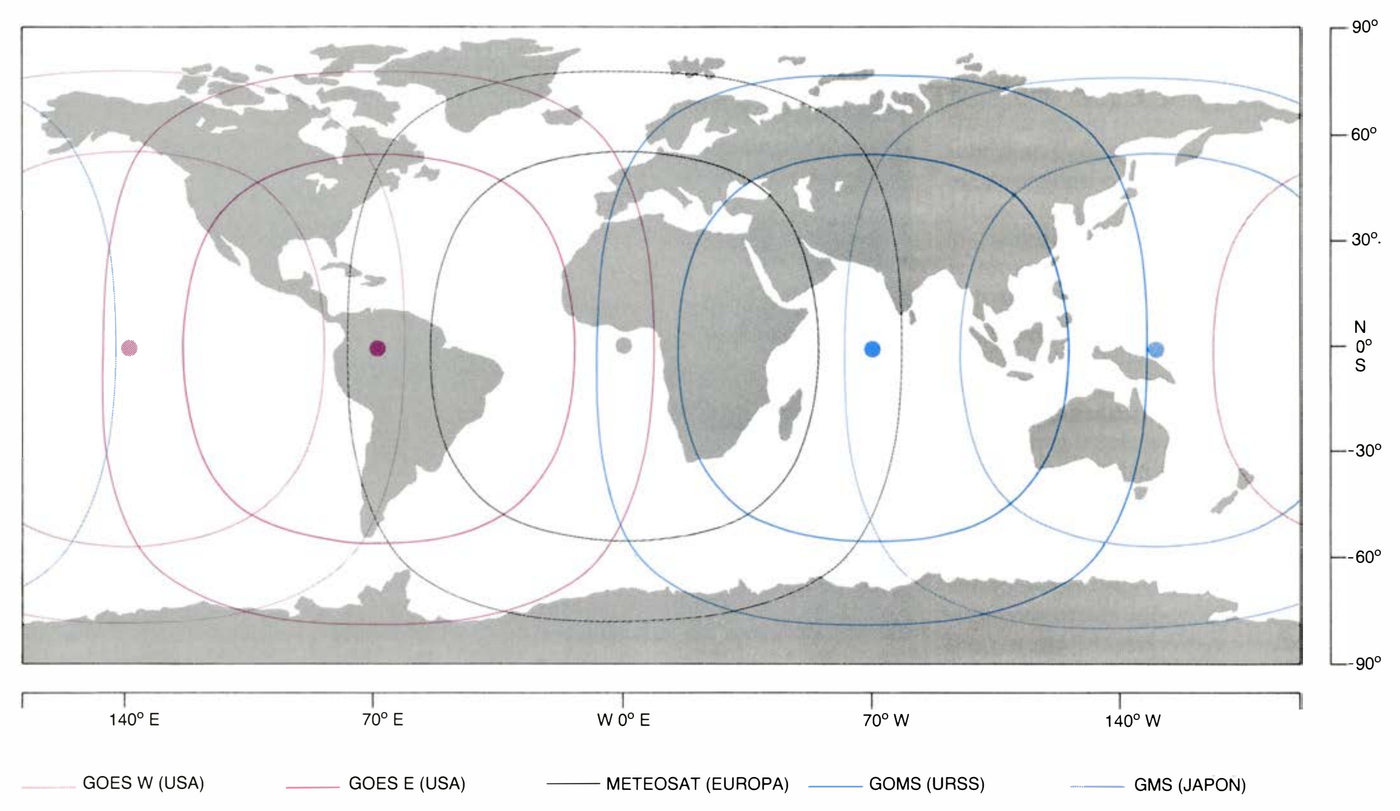
atmósfera en virtud de las absorciones delatoras de componentes gaseosos: ozono, vapor de agua y otros.

La radiación solar no es simple o monocromática (un solo color o frecuencia), sino que consta de varias frecuencias. Si interceptamos la trayectoria de la luz con un prisma, aparecerán los colores del espectro visible: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. Antes del rojo tenemos el infrarrojo; más allá del violeta, el ultravioleta. El físico extiende el "color" a toda la radiación electromagnética; a ese "color" o tonalidad lo llama frecuencia e introduce así la noción de fenómeno repetido, cíclico, ondulatorio.

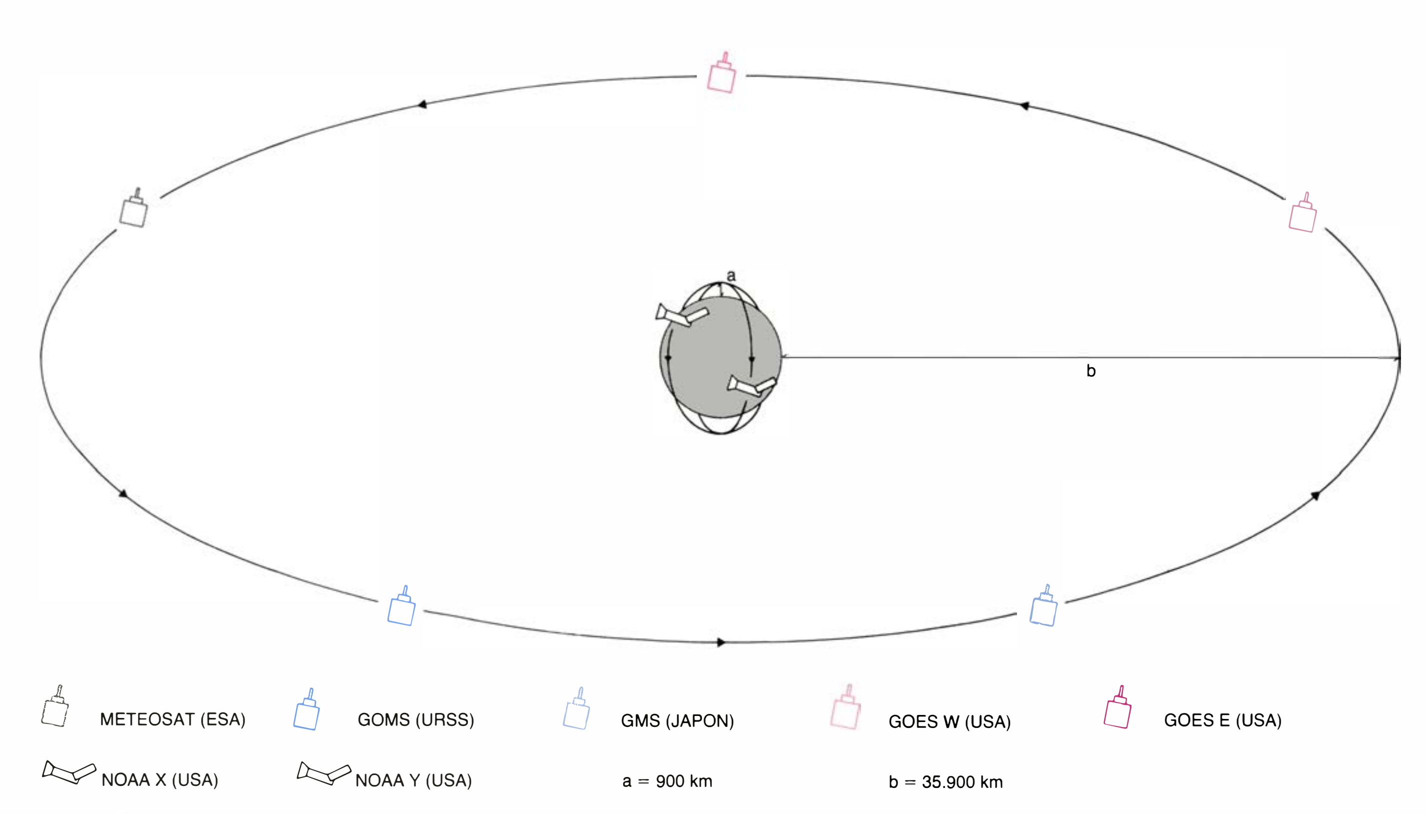
En los fenómenos ondulatorios existe una sencilla relación entre la frecuencia f, o número de ondas en la unidad de tiempo, y la longitud de onda, λ, a través de la velocidad c de propagación del fenómeno ondulatorio. Para la luz, $1/f = \lambda/c$. La longitud de onda asociada a la radiación solar cubre el intervalo desde 0,15 a 4,0 milésimas de milímetro, o micrometros.

La estructura vertical media de la atmósfera se divide, arbitrariamente, en capas. La inferior, de algo más de 10 kilómetros de altitud, tiene abundancia de contaminantes y su composición de nitrógeno, oxígeno y anhídrido carbónico es prácticamente constante, sin perjuicio de que la densidad disminuya con la altura, al igual que lo hace la temperatura. El vapor de agua varía en el tiempo y en el espacio, según las situaciones atmosféricas. Cuando termina esa capa baja, troposfera, empieza la estratosfera, al principio, según nos elevamos en altura, con una densidad constante, lo que se llama tropopausa. Luego, siempre siguiendo en altura creciente, la temperatura sube hasta un máximo en la tropopausa. Se produce un descenso térmico gradual en la llamada mesosfera, entre cincuenta y tantos y ochenta kilómetros de altura sobre la superficie terrestre. Aquí es muy baja la densidad; para nuestro propósito carece de mayor interés por cuanto va a haber poca materia que sea capaz de absorber energía. Podríamos despreciar también la mesosfera, si no fuera por la presencia de ozono, oxígeno en molécula triatómica. El ozono absorbe fuertemente radiación en la región de menor longitud de onda del espectro visible; sólo deja pasar una radiación solar claramente mutilada en ese extremo y termina en el ultravioleta en la longitud de onda de 0,2 micrometros.

La radiación solar en el borde superior de la atmósfera tiene una distribución de energía en cada región o inter-



4. SISTEMA DE SATELITES GEOESTACIONARIOS: está constituido por cinco unidades geosíncronas situadas a unos 36.000 kilómetros sobre la superficie terrestre. Los satélites GOES E y GOES W son norteamericanos, el METEOSAT es europeo y el GMS japonés; provisionalmente, el satélite GOMS ha sido sustituido por uno norteamericano, en cuya colocación en órbita participó decisivamente la estación terrestre de la Agencia Espacial Europea enclavada en Villafranca del Castillo, en la provincia de Madrid. El círculo en línea fuerte que rodea, a unos 65 grados de abertura, cada pie de vertical de satélite corresponde al límite de captación de imágenes de la superficie terrestre. Las líneas débiles circularmente rodeando a cada proyección subsatélite son las de observación del satélite desde tierra bajo una elevación de cinco grados que es un límite práctico de operatividad para las distintas antenas receptoras.



5. DURACION DE UNA ORBITA de un satélite heliosíncrono; tarda 115 minutos, en cuyo tiempo la Tierra ha girado 28,8 grados. Adicionalmente hay una rotación por día, correspondiente a la rotación de la Tierra alrededor del Sol que se cumple en un año, esto es, en 365 días. Las órbitas sucesivas van "visualizando" franjas solapadas en la superficie terrestre de 5000 kilómetros de anchura, dado el montaje de radiómetros en dispositivo de barrido y el desplazamiento relativo de los sucesivos planos orbitales respecto a la Tierra. Las estaciones de localización y control de la órbita del satélite Gilmore Creek y Wallop Island permiten seguir la trayectoria del satélite, a cuyo efecto separan, en la recepción de información, los datos de identificación de órbita.

valo de distinta longitud de onda (o equivalentemente de distinta frecuencia, según $1/f = \lambda/c$) bastante coincidente con el reparto de energía según las regiones del espectro de radiación emitida por un cuerpo radiador perfecto a la temperatura de unos 5726 grados Celsius (6000 grados en la escala Kelvin). Los mares, la tierra firme, los bancos de hielo, las montañas nevadas, los bosques y los lagos emiten con una distribución energética que por su menor temperatura se aloja en la región del infrarrojo medio, esto es, entre unos 3 y 50 micrometros para sus longitudes de onda.

Las moléculas constituidas por átomos de distintos elementos químicos, como el anhídrido carbónico y el vapor de agua, entre las existentes en el aire atmosférico, manifiestan una fuerte capacidad de absorber radiación, pero no con carácter general sino con preferencia destacada por radiación de determinadas longitudes de onda. Nos interesa en particular este efecto absorbente en el caso del vapor de agua, pues de la disminución de intensidad de radiación en las longitudes de onda en que el vapor de agua presenta absorción por resonancia podemos derivar la cantidad de vapor de agua existente en la correspondiente columna atravesada por la radiación.

Si para evaluar el contenido global de vapor de agua consideramos la disminución de intensidad, en los intervalos del espectro en que se sitúan las bandas de absorción, en la llamada región del infrarrojo próximo de la radiación solar reflejada, hay que proceder a una corrección: parte de la atenuación de intensidad procede de la presencia de aerosoles (partículas más bien microscópicas, en suspensión) en el aire atravesado por la radiación, y, en caso de que existan, de la presencia de capas nubosas; a ambos factores hay que añadir, tanto para cielo despejado como para cielo nuboso o cubierto totalmente de nubes, la modificación en la radiación solar que en parte sufre la difusión en las capas atmosféricas superiores.

Dejemos las bandas de absorción en el infrarrojo próximo y pasemos a analizar las del infrarrojo medio y lejano. ¿Qué hacer? La corrección a aplicar viene del hecho de que hay mayor repercusión por aumento relativo de la opacidad atmosférica asociada a la presencia de aerosoles. El conocimiento de la humedad en la estratosfera tiene solución más satisfactoria gracias a la existencia de absorción de energía en la radiación de longitud de onda de 1,64 centímetros, para la cual hay una límpida absorción por resonancia propia de la molécula de vapor de agua.

CANAL	RESOLUCION EN LA VERTICAL	LONGITUD DE ONDA EN MICROMETROS	UTILIZACION PRINCIPAL
1	1 KM	0,55-0,9	NUBES DIURNAS Y CONTORNOS TIERRA-MAR.
2	1 KM	0,725-1,1	DELINEACION DEL CONTORNO DE AGUA EN MARES.
3	1 KM	3,55-3,93	TEMPERATURA DEL AGUA EN SUPERFICIE. EN HORAS NOCTURNAS, MAPAS DE NUBES.
4	1 KM	10,5-11,5	TEMPERATURA DEL AGUA EN SUPERFICIE. MAPA DE NUBES DIA Y NOCHE.
5	1 KM	11,5-12,5	TEMPERATURA DEL AGUA EN SUPERFICIE.

6. CARACTERISTICAS DE LOS CANALES AUHRR de TIROS N. La información de los canales 1 y 2 sirve para determinar nubes, extensiones de nieve y hielo, así como los contornos de separación entre las aguas y la tierra firme. El canal 4 corresponde al infrarrojo, mide la nubosidad diurna y nocturna y determina la temperatura de radiación calorífica. Con los canales 3 y 4 se logra la evaluación de la temperatura de la superficie marina. El canal 5 se emplea para mejorar estas medidas en los trópicos.

La radiación con longitudes de onda que se enmarcan en la llamada región del infrarrojo próximo, de una superficie como la del mar, proporciona información de su temperatura de emisión. Los cuerpos, lo dijimos antes, emiten radiación según su temperatura. No obstante, a la hora de obtener las temperaturas de las aguas superficiales del mar a través de los medidores de intensidad de radiación, o radiómetros, hay que advertir que la temperatura de un cuerpo radiador perfecto (el mar no lo es, como bien lo prueba el que refleja la radiación solar, dando lo que llamamos reflejos) sería unos grados inferior a la verdadera. Otras causas de error se procuran subsanar mediante las oportunas correcciones, gracias a un programa de procesado de datos y del que tenemos un ejemplo en el que está aplicando Sánchez Muniosguren en el Instituto Nacional de Meteorología, que permitirá sacar conclusiones más precisas sobre frentes pesqueros y temperaturas de las playas turísticas, entre otros.

La determinación de la dirección y velocidad del viento fue acometida desde la primera época del empleo de satélites meteorológicos en que empezó a disponerse de fotografías de la cobertura nubosa. Todos aceptaban que las nubes observadas se movían de acuerdo con el viento reinante en ese nivel y zona. La preferencia estaba a favor de ciertas peculiaridades de las formaciones nubosas: yunques desprendidos de las nubes tormentosas, alineaciones de nubes, ondas de montaña, corte neto de la nubosidad en el borde de la corriente en chorro (verdaderos rollos de viento máximo asociados con las penetraciones activas de masas de aire y con la formación de depresiones o núcleos, en general, de mal tiempo) ecos, en nubes, del perfil de islas, etcétera. Puesto que la capa de aire suprayacente sobre la superficie del agua tiene movimiento, podemos determinar también la velocidad del viento en aquella capa aérea, basándose en el empleo de radiación de frecuencia de 5300 millones de hertz.

Examinadas las principales posibilidades de obtención de valores de variables meteorológicas de la superficie y atmósfera terrestre partiendo de las medidas en la radiación recibida en las cámaras radiométricas, describiremos un ejemplo de cada grupo de satélites: geoestacionarios y orbitales polares. Los primeros forman una cadena de cinco unidades sobre el Ecuador terrestre en verticales practicamente fijas.

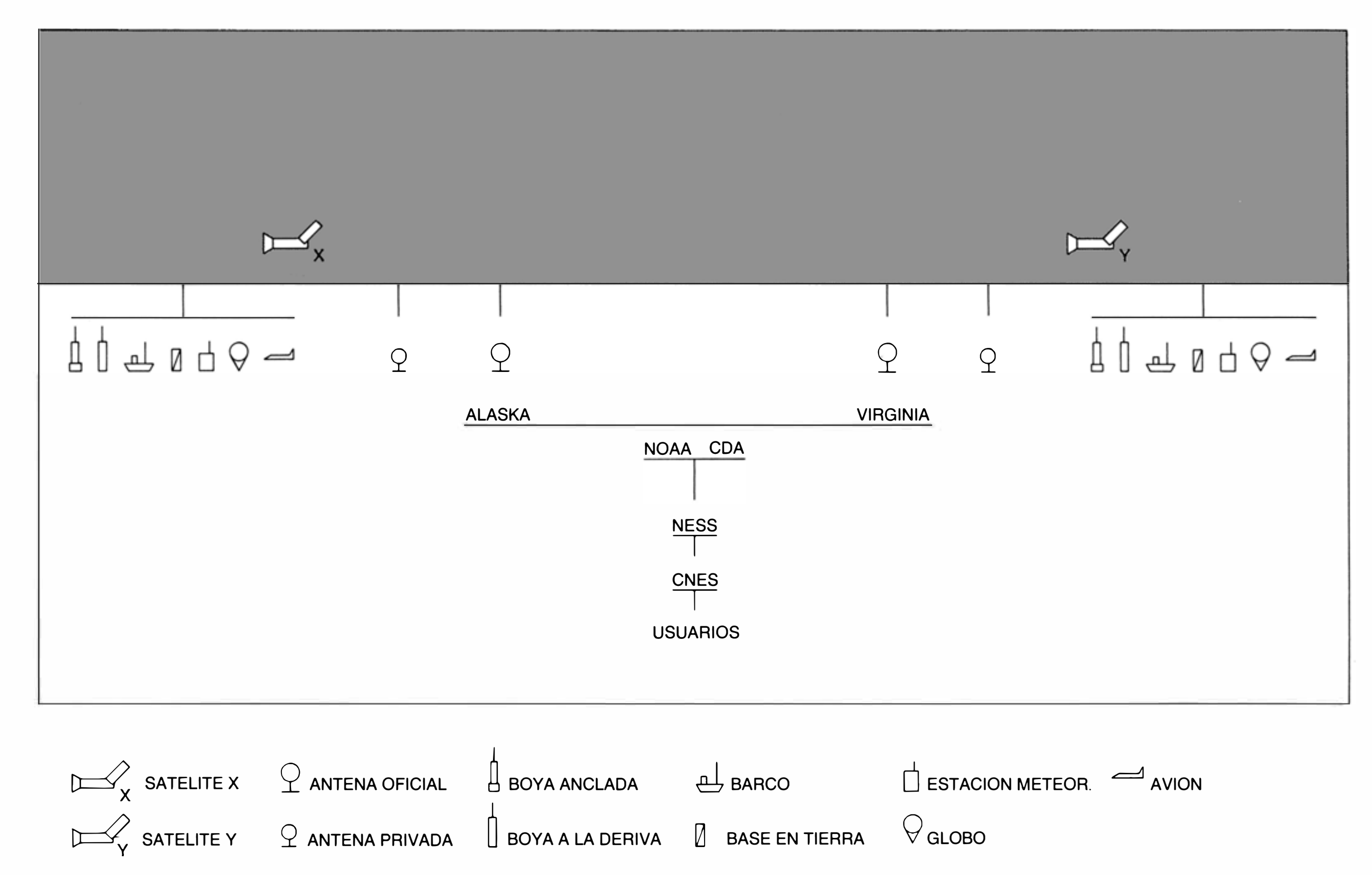
Los cinco satélites meteorológicos geoestacionarios están emplazados a distancias aproximadamente iguales sobre el Ecuador. Son estacionarios respecto a la Tierra, por coincidir el período de su órbita a 36.000 kilómetros sobre la superficie terrestre con el de rotación del planeta en torno a su eje propio. Pero el período de rotación de un satélite artificial está perturbado por las masas de otros astros, especialmente el Sol y la Luna, así como por la acción del viento solar. Los desplazamientos en altura, en inclinación de la órbita respecto al Ecuador terrestre y en excentricidad originarán un posicionado no permanente en la vertical deseada. Estas desviaciones pueden ser

corregidas mediante lanzamiento de chorros de gases con un impulso igual al impulso que en reacción de sentido contrario afectará al satélite. Las reservas de cada artefacto orbital artificial para estas correcciones son bastante limitadas y garantizan una operatividad correcta de sólo dos o tres años.

Un satélite "fijo" respecto a la Tierra a esa altura de 36.000 kilómetros tiene la capacidad de "contemplar" un hemisferio casi entero; el cono tangente a la Tierra desde el propio satélite alcanza un área superficial terrestre algo menor que un hemisferio. (Las frecuencias radioeléctricas y la órbita de los satélites geoestacionarios son recursos naturales limitados que deben utilizarse en forma eficaz y económica para permitir el acceso equitativo a órbita geoestacionaria, y a esas frecuencias convenidas, a los diferentes países o grupos de países, según sus necesidades y medios técnicos.)

Las características de los distintos satélites geoestacionarios guardan entre sí varias semejanzas; cada uno sirve una parcela del mismo proyecto. Sea el modelo europeo METEOSAT 1; pesó 697 kilogramos al principio por incluir 345 kilos del motor de apogeo y el combustible (hidracina) de reserva para correcciones. El satélite propiamente dicho tiene un diámetro de 2,1 metros y una altura en estación de unos 3,2 metros. La estabilización está asegurada por giro en torno a su propio eje a razón de 100 vueltas cada minuto. Los generadores heliovoltaicos proporcionan una potencia superior a 200 watt durante la proyectada vida activa del satélite, que es de unos dos años. El control de altitud y órbita se consigue con un sistema de 2 × 3 grupos de toberas que, utilizando hidracina como combustible, pueden proporcionar impulso corrector de anomalías de órbita en dos niveles de empuje. El cilindro mayor de los que constituyen el cuerpo del satélite contiene casi todos los subsistemas, entre ellos el radiómetro. La superficie del cilindro grande está cubierta por 16.128 células fotovoltaicas de 2 × 2 centímetros cada una. El cilindro o tambor situado coaxialmente, por encima del cilindro principal, presenta varias caras en las que están dispuestas los dipolos, activados secuencialmente en sentido de rotación antigiro, en sentido contrario al giro propio del satélite. Estos dipolos emiten en la llamada banda *S* (1670-2110 megahertz) y envían a tierra la información correspondiente a las intensidades radiométricas percibidas en cada uno de los puntos de cada imagen de parte de la superficie terrestre observada por la cámara radiométrica del METEOSAT. Son las imágenes en bruto que se recibirán en tierra y plasmarán en fotografías o archivarán en registros magnéticos y memorias de ordenador. La estación receptora encargada de ello es la llamada estación principal PDUS. La estación de Darmstadt/Odenwald, en Alemania Occidental, depura y simplifica la información de las imágenes primarias, devolviéndola al propio satélite, que actúa como repetidor o "relé" y las difunde a un número más amplio de usuarios que la reciben por sus estaciones secundarias o SDUS.

El METEOSAT cumple varias misiones más. Así, explora la parte de superficie terrestre y nubes en la región de luz visible y en el infrarrojo. En la imagen

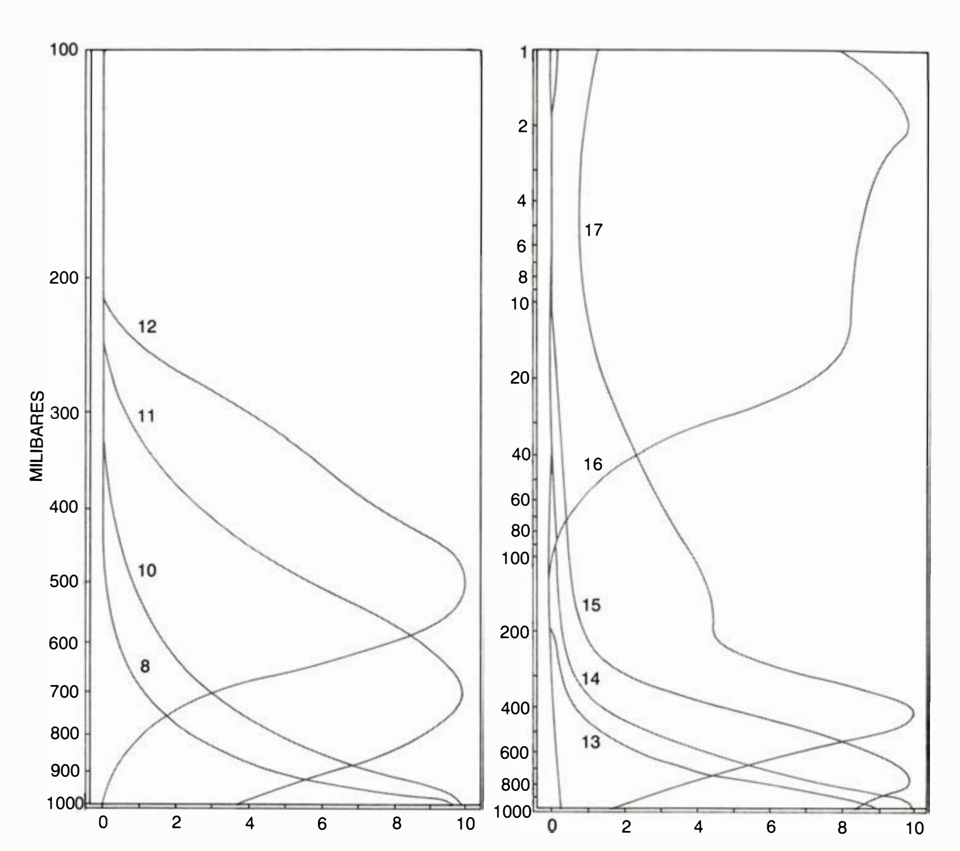


7. EL SISTEMA METEOSAT acomete las operaciones de vuelo con el LBT, "transponder" o estación eco en tierra. Está conectado con plataformas de recogida de datos, representadas por globos de trayectoria isobárica libre, boyas meteorológico-oceanográficas, estaciones automáticas o semiautomáticas de la red de vigilancia mundial y equipos de toma de datos meteorológicos a bordo de barcos y aviones. Los datos en bruto se transmiten a la estación DATTS y de aquí mediante líneas normales de comunicación (DTRS) al sistema de calculador METEOSAT en tierra y al centro de control (MCC). Otra estación relé es la GMS de Lannion, que, como el MGCS de Darmstadt, remite informaciones a los usuarios, incluso por el sistema global de telecomunicaciones.

filtrada para registrar sólo la radiación de longitudes de onda en el espectro visible (de 0,4 a 1,1 micrometros), el examen en retícula ideal comprende 5000 líneas y en cada línea 5000 puntos; se consigue una resolución espacial de 2,5 kilómetros en el punto subsatélite, esto es, en el entorno inmediatamente "bajo" la vertical del satélite. En el infrarrojo medio (filtro o ventana que deja pasar longitudes de onda entre 10, 5 y 12,5 micrometros), cada imagen consta de 2500 líneas y cada línea de 2500 elementos informativos, con una resolución espacial que es máxima en el punto subsatélite con el valor de 5 kilómetros. Análogo valor para el canal empleado para la detección del vapor de agua y que es elegido en la ventana de longitudes de onda de la radiación recibida entre 5, 7 y 7,1 micrometros en que se manifiesta la absorción selectiva en cuantía proporcional a la cantidad de vapor de agua existente en la columna atmosférica atravesada por la radiación que llegó a la cámara radiométrica del satélite.

Otras funciones son la difusión de datos, en las frecuencias de 1691,0 y 1694,5 megahertz, la recogida en UHF (400-470 megahertz) de datos difundidos por las emisoras y enlace en VHF (137-149 megahertz) para telemetría, telemando y funciones de alcance.

El principal elemento del METEOSAT es el radiómetro, que mide la intensidad de radiación en los tres canales: visible, infrarrojo térmico e infrarrojo de vapor de agua. Desde un punto de vista óptico, el radiómetro es un telescopio con una amplia apertura de 400 milímetros, dotado de un motor de barrido a saltos sincronizado con la rotación propia del satélite; posee, además, los tres sensores necesarios en las regiones espectrales señaladas. Las imágenes terrestres se generan cada media hora; surge cada línea a medida que el radiómetro barre el sector terrestre, que le es accesible a su exploración "visual", mediante el movimiento rotatorio del satélite. El paso de una línea a la siguiente va resultando por el salto que sincronizadamente efectúa el telescopio del radiómetro según la rotación propia del satélite. La óptica del telescopio radiométrico está configurada por cinco espejos complejos que, con el quebrado del eje óptico en varios tramos, permiten una importante longitud óptica frente al reducido espacio disponible, además de conducir la focalización de la ventana o selección que corresponda a cada región resultante de la dispersión del haz de entrada hacia el sensor especializado. Para la región espectral visible de la radiación porta dos detectores o sensores, que son simples pastillas de silicio. También están repetidos los sensores de infrarrojo térmico, pero es único el sensor utilizado para la región de infrarrojo sensible a la existencia de vapor de agua en la columna atmosférica atravesada por la radiación procedente de la Tierra.

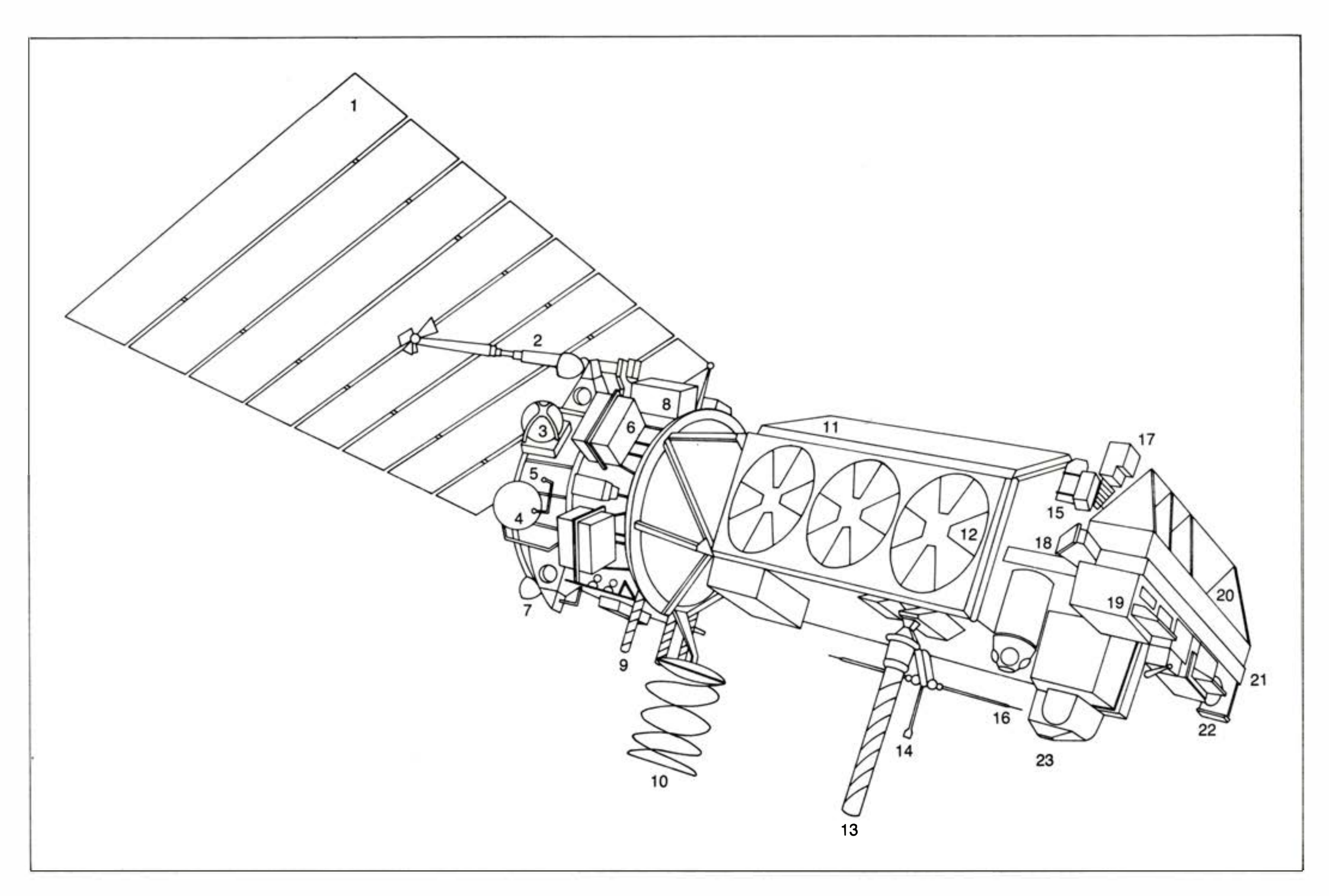


8. GRAFICAS DE PONDERACION de las medidas en el equipo HIRS para distintos canales y según el nivel de la capa atmosférica sobre la tierra. El canal 8 es una "ventana atmosférica"; los canales 10, 11 y 12 corresponden a la absorción por vapor de agua; 15 y 16 a anhídrido carbónico y óxido de nitrógeno.

Los datos correspondientes a la imagen en bruto obtenida por el radiómetro son transmitidos a la estación de adquisición de datos, telemetría y trayectoria (DATTS); de aquí, mediante líneas ordinarias de comunicación (DTRS), al sistema de cálculo METEOSAT en tierra (MGCS) y al centro de control (MCC), en donde se incorporan también los mensajes de las plataformas de recogida de datos (DCP) y los de mantenimiento del vehículo espacial. El sistema de calculador de METEOSAT en tierra está conectado asimismo con el sistema global de transmisión de datos, por el que pueden llegar a todos los servicios e instituciones meteorológicas los valores de las variables meteorológicas en puntos de la rejilla geográfica ideal de la superficie de la Tierra. Pueden llegar incluso los sondeos simulados por su sistema TVOS, que proporcionan valores de temperatura, humedad, etcétera, a distintos niveles en distintas verticales de la atmósfera.

Otra estación relé, además de la de Darmstadt, es la de Lannion en Francia. Opera sobre los datos de los satélites GOES E y W, respectivamente sobre el ecuador sudamericano y sobre el Pacífico central; los pone a disposición de los usuarios del METEOSAT, si bien en versión reducida y algo retrasada. Importa destacar la importancia de la estación "transponder" (LBT), encargada de devolver amplificada la señal captada del satélite; desde su emplazamiento en la Guayana puede localizar el satélite, en su posición ocasionalmente perturbada, en función del tiempo.

El METEOSAT 1 tuvo una vida activa real de dos años, desde su lanzamiento el 23 de noviembre de 1977 y hasta igual mes de 1979, en que un dispositivo de protección de la alimentación eléctrica empezó a impedir la toma de imágenes y su difusión, aunque no se entorpecía la toma de datos de las plataformas de recogida de datos procedentes de las estaciones automáticas (DCP). El sustituto, METEOSAT 2, fue puesto en posición geoestacionaria un mes después de su lanzamiento por medio del ARIANE; es operativo desde el 11 de agosto de 1981.



9. TIROS N es el primer ejemplo de la tercera generación de satélites de órbita polar. En la figura se señalan la situación de los componentes de alimentación energética, los equipos de medida y de transmisiones y los conjuntos y tanques para puesta en órbita y correcciones. De izquierda a derecha vemos: *1*, paneles solares; *2*, motor de arrastre de los paneles solares; *3*, tanque de nitrógeno; *4*, tanque de hidracina; *5*, estructura soporte del sistema de reacción; *6*, módulos de baterías; *7*, conjunto motor-cohete; *8*, electrónica de movimiento de los paneles; *9*, antena omni-banda *S*; *10*, antena VHF tiempo real; *11*, módulo equipo soporte; *12*, molinete de aspas de regulación térmica; *13*, antena del sistema de recogida de datos UHF; *14*, antena omni-banda *S*; *15*, detector de partículas alfa y protones de alta energía; *16*, antena y baliza de mando; *17*, detector de protones y electrones de energía media; *18*, sensor de detección solar; *19*, sonda infrarrojos de alta resolución; *20*, unidad de medida inercial; *21*, plataforma de sombreo de montaje de instrumentos; *22*, radiómetro avanzado de muy alta resolución y, *23*, unidad de sondeo estratosférico. TIROS N cruza el Ecuador en dirección Norte a las 15.30, hora local.

Representativo de los satélites de órbita polar, o casi polar, es el TIROS N, perteneciente a la tercera generación de este tipo. Opera desde octubre de 1978. Igual que el NOAA 6, tiene una órbita sincronosolar, entre 870 y 830 kilómetros de distancia a la superficie terrestre; TIROS N cruza el Ecuador en dirección hacia el Norte a las 15.30 hora local, mientras que el NOAA 6 cruza el Ecuador hacia el Sur a 07.30 hora local. (Esta constancia de hora de cruce califica a estos satélites orbitales de heliosíncronos.) Ante la alternativa de asegurar la operación por dos satélites o duplicar los equipos en uno de ellos, para en caso de fallo poder sustituirlos, se ha optado por tener siempre en órbita dos satélites orbitales con equipamiento similar. El número de veces que cada día resulta barrida una zona cualquiera de la Tierra viene así a duplicarse.

El satélite NOAA consta de cuatro instrumentos fundamentales: un radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR), una sonda vertical operativa TIROS (TVOS), un sistema de recogida de datos y localización de las plataformas y un monitor ambiental espacial. Los datos de la transmisión automática de fotografías (APT) son difundidos en muy alta frecuencia (VHF, de 137,5 a 137,62 megahertz), mientras que los de transmisión HRPT lo son en la banda *S* (1698,0 o 1707,0 megahertz). También se emplea la VHF para las emisiones del sensor TVOS, que es el encargado de calcular los valores de variables meteorológicas a distintos niveles sobre los puntos elegidos y que, como explicamos, permiten simular los correspondientes sondeos aerológicos en esos mismos puntos geográficos.

Los datos para la transmisión a las estaciones terrestres, en la modalidad ATP o en la HRPT, se extraen del radiómetro de muy alta resolución que gira a la velocidad de 360 vueltas por minuto; trabaja en cinco canales, cada uno de los cuales selecciona, por la correspondiente ventana, la radiación recibida en un intervalo de longitudes de onda.

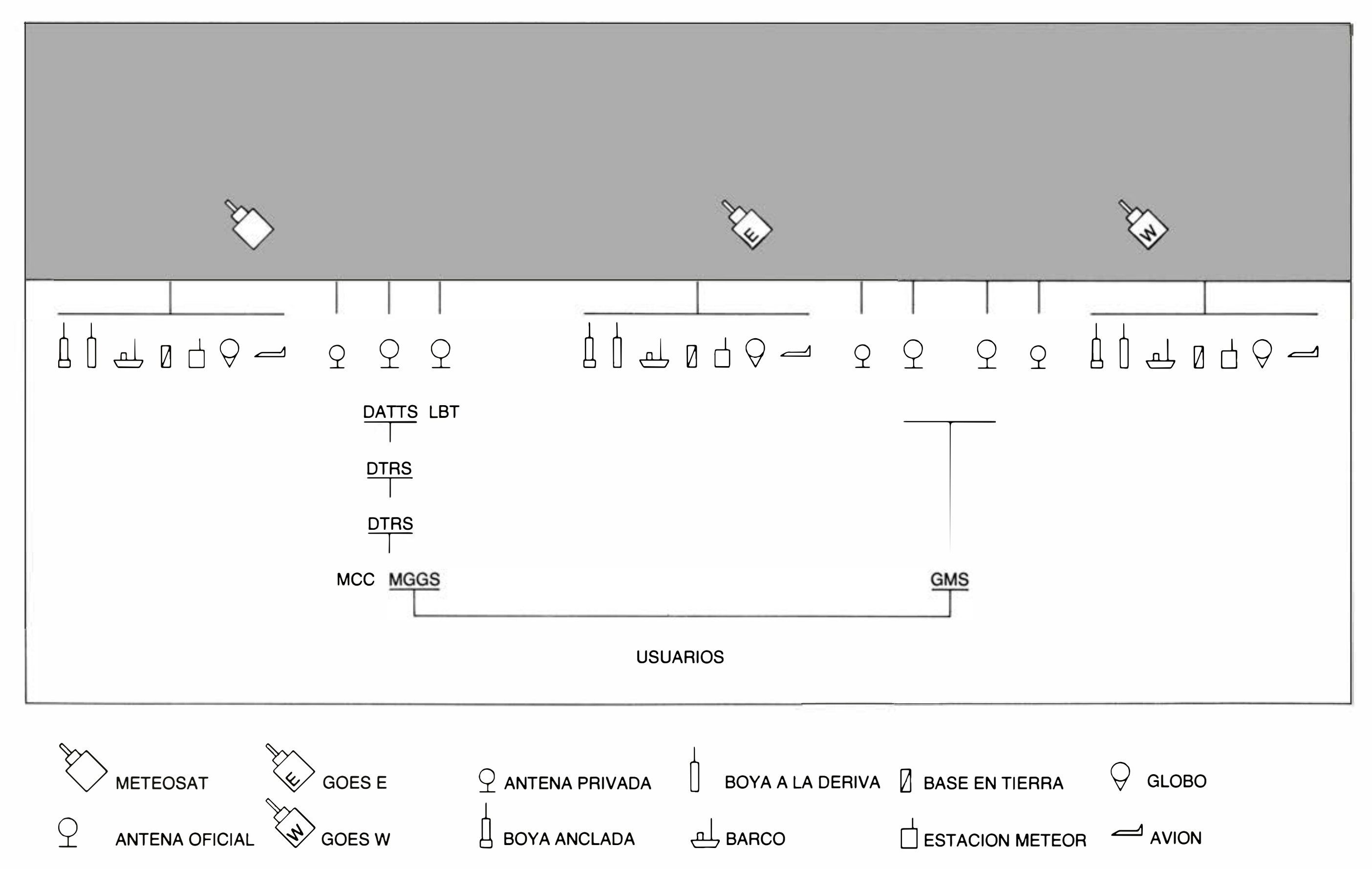
Para el sondeo termodinámico equivalente en cada región escogida, el sistema TVOS, de que va dotado el satélite TIROS N, utiliza no sólo veinte canales HIRS (con longitudes de onda centrales entre 15,00 y 0,70 micrometros), sino también datos en el dominio de las microondas, ondas centimétricas, que a diferencia de lo que ocurre con la radiación en el dominio infrarrojo, apenas si son absorbidas en las nubes de agua, permitiendo así la penetración o sondeo en aquellas zonas que estuvieran cubiertas por la nubosidad. La consecución de sondeos precisos de temperatura exige evaluar bien el vapor de agua y el ozono en las capas atmosféricas atravesadas por la radiación que se examina en el radiómetro. La extensión de los sondeos a la estratosfera está encomendada a tres canales mediante célu-

las de anhídrido carbónico gaseoso y modulación de presión, que delatan la temperatura de la estratosfera.

El proceso de convertir las medidas de radiancia captadas en los 27 canales de sondeo TVOS en valores de temperatura y humedad en cada nivel de cada vertical elegida en la atmósfera necesita de un importante programa y sistema material de computación. Se logra este sorprendente resultado de reconstrucción de la respuesta, a la radiación que la atraviesa, de los diversos componentes de la atmósfera, incorporando al programa de ordenador las funciones de calibración con los coeficientes de peso o ponderación de las medidas en los diferentes equipos y canales de TVOS para los diferentes niveles en que se atribuyen los correspondientes valores de absorción selectiva de la radiación por los componentes atmosféricos.

El sistema de recogida de datos procedentes de estaciones automáticas de observación se denomina ARGOS y constituye ahora una de las tareas fundamentales del satélite TIROS N. La localización de una plataforma de recogida de datos complementa la recogida de mensajes por este proyecto en marcha desde hace años. La determinación posicional de una de esas plataformas de recogida de datos resulta de la intersección de dos conos de posible situación del satélite, y según una semiabertura cónica igual al ángulo de observación de la plataforma, con la tangente a la trayectoria en cada uno de los dos puntos mencionados. La ambigüedad queda rota utilizando dos conos de detección. Para conocer la deriva de una boya libre semiarrastrada por las corrientes marinas, como ejemplo de situación variable del emisor de partes meteorológicos, conviene acudir a localizaciones durante órbitas diferentes del satélite, entre las que haya transcurrido el tiempo en que se desea apreciar el movimiento o deriva.

La emisión de la plataforma debe producirse inicialmente en la frecuencia exacta de 401,650 megahertz, pero el satélite la va a recibir en otra frecuencia distinta en virtud del efecto Doppler, que es el efecto físico de variación de la frecuencia de una perturbación ondulatoria emitida por un cuerpo en movimiento o captada por un receptor que también sea móvil. En un centro espacial preparado para el sistema ARGOS, como el de Toulouse, se determina la situación de la plataforma y sus desplazamientos, por ejemplo en 24 horas, gracias a esa variación de frecuencia por efecto Doppler. Ello significa que serán conocidas las corrientes marinas y se evaluarán mejor las influencias del mar en la meteorología. Entre ellas están las razones de períodos anómalos de sequías: la que sufre Etiopía-Eritrea, las que ocurren en el nordeste del Brasil e incluso las del Bajo Guadalquivir, posiblemente relacionadas con la inercia térmica del golfo de Cádiz.



10. DOS SATELITES METEOROLOGICOS DE ORBITA POLAR constituyen un complejo operativo excelente para la incorporación de los datos captados por los sensores de las plataformas de recogida de datos. Los dos satélites meteorológicos de órbitas cruzadas han sido designados convencionalmente como satélites *X* e *Y*. Esquematizamos dos estaciones NOAA para la localización del satélite y la determinación precisa de su órbita: son las de Gilmore Creek, en Alaska, y Wallops Island, en Virginia. El dibujo incluye varios ejemplos, sin ubicación transcendente, de plataformas de recogida de datos y que en 401,650 megahertz emiten hacia el correspondiente satélite a su alcance de antena. Vemos una plataforma a bordo de un barco, otra en un globo de gran altitud y otras en bases o estaciones meteorológicas automáticas o semiautomáticas en tierra, además de las instaladas en algunas boyas ancladas y otras a la deriva, como ejemplo de utilización del sistema ARGOS en el que la concentración final y procesado de datos para distribución a los usuarios por télex, sistema global de telecomunicaciones, correo, etcétera, corre a cargo de la cooperación del CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales), NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) y NASA. Se esquematizan los pasos de información ARGOS de NOAA a NESS en Suitland y a CNES en Toulouse. Gracias al empleo de dos satélites en órbita polar se determinan secuencias de posiciones de cada plataforma móvil y de corrientes marinas.

Memoria atómica

Los sistemas atómicos originados a partir de ciertos estados ordenados retornan a su situación primitiva. El estudio de la cuantía con que el orden se recupera permite investigar determinadas interacciones difíciles de observar hasta ahora

Richard G. Brewer y Erwin L. Hahn

Ludwig Boltzmann, uno de los fundadores de la termodinámica moderna, pronunció, en 1872, una conferencia en la que afirmaba que la entropía de los sistemas aislados, su desorden, aumenta irreversiblemente a medida que transcurre el tiempo. Al escuchar esta afirmación, el físico Joseph Loschmidt expresó su desacuerdo, argumentando que las leyes que gobiernan el movimiento de todas las partículas son simétricas respecto al tiempo. En consecuencia, todo sistema que haya evolucionado del orden al caos podría recuperar de nuevo su orden original invirtiendo, simplemente, el momento de cada partícula, sin que la energía cinética total del sistema resultara afectada. En respuesta a este argumento, Boltzmann señaló con el dedo a Loschmidt y dijo, "es usted el que invierte los momentos".

Esta discusión académica ilustra la naturaleza paradójica del segundo principio de la termodinámica, que establece que todos los sistemas tienden a evolucionar hacia una entropía máxima. A pesar de ello, el argumento de Loschmidt parece convincente. Si fuéramos capaces de filmar los movimientos de un grupo pequeño de partículas y proyectar posteriormente la película a un físico, éste no podría afirmar si el proyector estaba moviéndose hacia adelante o hacia atrás. Por tanto, de acuerdo con la crítica de Loschmidt (que se conocería luego como "paradoja de Loschmidt"), cualquier ley que gobierne el comportamiento de conjuntos grandes de partículas debería ser simétrica con respecto al tiempo. Aunque el significado y las implicaciones del segundo principio son todavía objeto de investigación y controversia, existen varios métodos para llevar a cabo la inversión temporal de Loschmidt. En otras palabras, un sistema de partículas que se haya visto evolucionar a partir de un estado altamente ordenado puede ser devuelto a dicho estado invirtiendo los movimientos (o cualquier otro grado de libertad) de las partículas que lo constituyen. De hecho, un conjunto de átomos posee cierta memoria de su condición original.

Para que un sistema muestre esta clase de memoria atómica, debe preparársele con algún tipo de orden, con frecuencia oculto en un estado aparentemente desordenado. En los sistemas atómicos que se tomarán en consideración, este orden oculto se obtiene exponiendo los materiales (que pueden ser sólidos, líquidos o gases) a una radiación electromagnética coherente de un tipo determinado como, por ejemplo, radioondas, microondas o haces de láser. Las ondas acústicas pueden desempeñar también este papel. La reaparición de un estado ordenado en tales sistemas se pone de manifiesto en el momento en que la muestra emite su propia radiación electromagnética coherente, eco de la radiación original. Además de su interés intrínseco, el estudio de estos pulsos de eco y de formas de emisión coherente relacionadas con ellos permite investigar, por nuevos caminos, el comportamiento fundamental de las interacciones atómicas.

Para entender el concepto de orden oculto recurriremos a la ayuda de una analogía. Imaginemos un grupo de corredores dispuestos en la línea de salida de una pista circular [*véase la figura 2*]. Cuando el juez de pista dispara la pistola, la carrera empieza y los corredores se dispersan por las calles, cada uno con una velocidad diferente y constante. Cuando todos los corredores han dado varias vueltas a la pista, algunos se habrán adelantado y no existirá ya una correlación visible y clara entre las posiciones de los corredores y sus respectivas velocidades. El espectador que no haya visto el comienzo de la carrera podría creer que no existe un orden determinado en la disposición de los corredores y que, por tanto, constituyen un sistema desordenado.

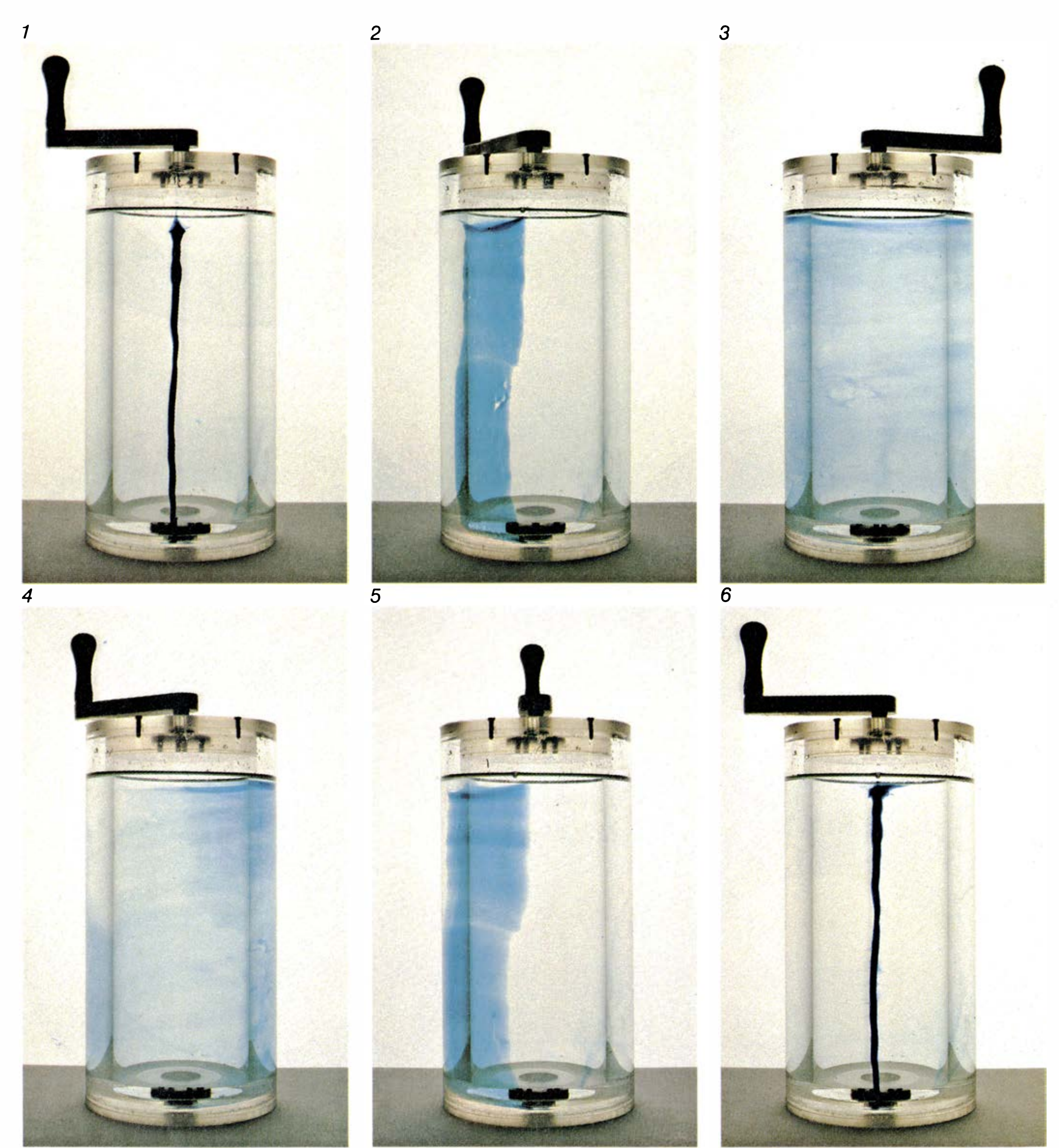
Supongamos ahora que todos los corredores dan la vuelta y recorren la pista en sentido inverso cuando se produce una determinada señal (por ejemplo, un segundo disparo de la pistola del juez) al cabo de t minutos de iniciada la carrera. Si todos los corredores mantienen sus velocidades en el sentido inverso, se irán reuniendo y cruzarán la meta juntos al cabo de $2t$ minutos de iniciada la carrera. (Por supuesto, el orden desaparecerá de nuevo a partir del momento en que los corredores crucen la línea de salida.)

El caso más simple, en que todos los corredores avanzan con la misma velocidad radial, debe tomarse también en consideración. En este caso, el orden inicial se mantiene y no hay necesidad de invertir el sentido en que se mueven los corredores. Este ejemplo tiene una analogía electromagnética, conocida por efecto de decrecimiento de inducción libre, de uso en las regiones de radiofrecuencia y del espectro visible.

Un ejemplo más concreto del efecto de memoria se puede ilustrar por medios mecánicos. Supongamos que en el volumen comprendido entre dos cilindros de plástico concéntricos existe un fluido viscoso. Supongamos que el cilindro externo está en reposo, mientras que el más interno gira libremente alrededor de su propio eje. Un filete de tinta coloreada, que representa una alineación inicial de partículas, se inyecta en el fluido. Cuando el cilindro interno gira, la tinta se dispersa en el seno del líquido. Si el volumen comprendido entre ambos cilindros se mostrara a un físico termodinámico, éste diría que la tinta está completamente desordenada (es decir, que la correspondiente entropía es máxima) y que el proceso de mezcla es completo e irreversible. En realidad, el líquido se encuentra en un estado de orden oculto (o entropía constante); la inversión de la rotación del cilindro interno invierte el proceso de mezcla; tras producir un número igual de rotaciones en sentido inverso, el hilo de tinta reaparece.

En el año 1950, uno de los autores de este artículo (Hahn), a la sazón en la Universidad de Illinois, descubrió un efecto de memoria que, en principio, es similar a los casos de los corredores y del hilo de tinta, pero a escala atómica. Colocaba una muestra de glicerina en un campo magnético y se exponía a dos pulsos breves de radiación electromagnética de radiofrecuencia (rf), separados por un intervalo *t* de algunas centésimas de segundo. La muestra retenía una memoria de la secuencia de los pulsos y, transcurrido un tiempo de 2*t* segundos desde la llegada del primer pulso de radiofrecuencia, la muestra emitía un tercer pulso, o eco. Este fenómeno se conoce con el nombre de eco de espín nuclear.

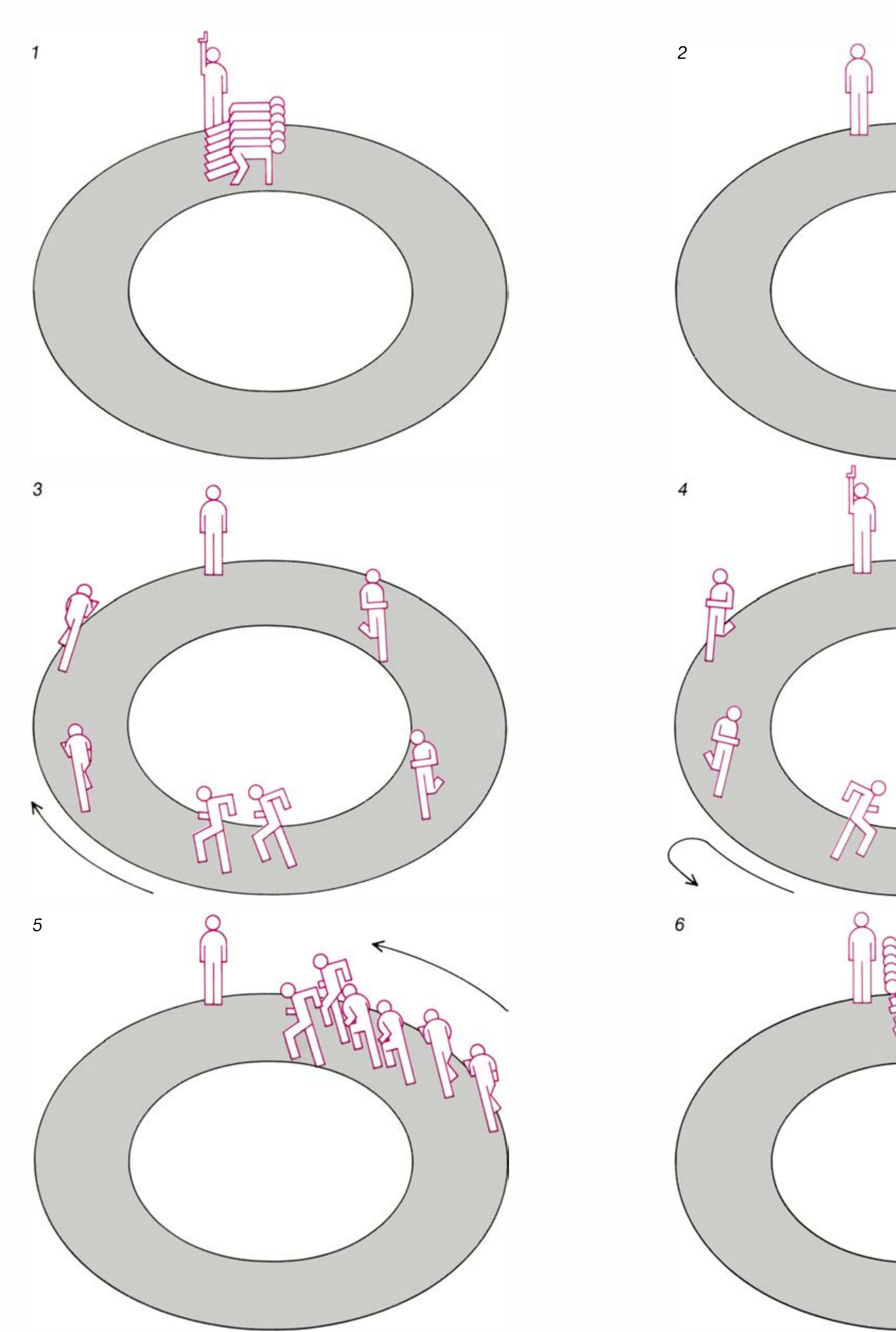
El eco de espín nuclear es una consecuencia de las propiedades giromagnéticas de los núcleos atómicos, tales como el protón que constituye el núcleo de la mayoría de los átomos de hidrógeno. Por girar sobre sí mismo y estar eléctricamente cargado, el protón posee un momento magnético, magnitud similar en muchos aspectos al momento angular de un giróscopo. El eje del espín de un protón que no esté alineado en el seno de un campo magnético constante, al igual que el eje de un giroscopio inclinado en un campo gra-



1. EXISTENCIA DE UN ORDEN OCULTO: se evidencia con este dispositivo constituido por dos cilindros de plástico transparente dotados de un eje común. El volumen comprendido entre los dos se llena con un líquido viscoso y transparente. Se inyecta un hilo de tinta, es decir, una fila de partículas inicialmente ordenada (*1*). El cilindro externo se mantiene en reposo mientras se hace girar el interno (*2*) hasta que la tinta parece mezclada con el fluido (*3*). La alineación original se ha perdido, pero cuando el cilindro interno invierte su movimiento de rotación (*4, 5*), las partículas recuperan su alineación (*6*).

vitatorio constante, efectúa un movimiento de precesión, es decir, describe un círculo alrededor de una línea paralela al campo de fuerzas [*véase la figura 3*]. La frecuencia de precesión, frecuencia con que el eje del protón describe el círculo citado, depende en parte de la intensidad del campo magnético externo. Esta tendencia del eje del espín del protón a efectuar un movimiento de precesión alrededor de un campo constante aplicado constituye la base del eco de espín.

En un experimento de eco de espín, las componentes constantes de los espines de los protones de la muestra están alineados inicialmente en una dirección paralela al campo magnético externo. Dado que dichas componentes son exactamente paralelas al campo, no efectúan movimiento alguno de prece-



2. LOS FENOMENOS DE ECO ELECTROMAGNETICO encuentran una analogía muy clara en la configuración de unos corredores en una pista. En la línea de salida (*1*), los corredores se hallan en un estado enteramente ordenado. Cuando el juez dispara su pistola y la carrera empieza, los corredores se dispersan (*2*) hasta que la relación entre unos y otros aparece desordenada (*3*). (La relación alcanza el máximo desorden cuando algunos corredores han sobrepasado a otros.) Cuando el juez de pista dispara de nuevo su pistola (*4*), los corredores invierten el sentido de su marcha, de forma tal que los corredores de cabeza pasan a ocupar ahora los últimos lugares (*5*). En el dibujo n.º *6*, el orden original se ha recuperado del todo, tras alcanzarse unos a otros.

sión (de forma análoga a lo que sucedería con un giroscopio perfectamente vertical). Se aplica, entonces, el primer pulso de radiofrecuencia. Este pulso rf contiene una componente polarizada circularmente –un pequeño campo magnético rotatorio– que gira con la misma frecuencia con la que los ejes del espín de los protones efectuarían su movimiento de precesión si estuvieran no alineados con el campo constante y si éste fuera el único campo presente.

El pulso de rf da lugar a que el conjunto de protones efectúe un movimiento muy complicado que se puede describir como una combinación de dos movimientos de precesión más sencillos [*véase la figura 4*]. El menos complejo de estos dos movimientos es una precesión alrededor del campo externo estático: el pulso de rf inclina los ejes del espín, apartándolos de la alineación con el campo constante (aunque todos ellos permanecen esencialmente alineados entre sí mientras dura el pulso); dichos ejes incoan un movimiento de precesión alrededor de las líneas del campo estático con una frecuencia de precesión normal. Dado que el campo magnético contenido en el pulso gira también con esta frecuencia, el ángulo formado por el campo rf rotatorio y el eje del espín de cualquier protón se mantiene constante a medida que los espines de los protones desarrollan su movimiento de precesión. Desde el punto de vista de los protones, el campo del pulso parece de dirección constante. Por tanto, los espines de los protones efectúan un movimiento de precesión tanto alrededor de dicho campo como alrededor del campo constante. La combinación de ambos movimientos de precesión dibuja una espiral descendente, trazada por el eje de espín de cada protón.

El ángulo de inclinación de los protones viene determinado por la intensidad y duración del pulso rf. En una experiencia típica de eco de espín, este primer pulso puede fijarse temporalmente de forma tal que la inclinación de los espines de los protones sea de 90 grados respecto a la vertical; en otras palabras, dichos espines se sitúan en un plano que es perpendicular a su orientación inicial.

Si el campo magnético se mantiene constante, los espines de los protones realizan un movimiento de precesión al unísono en su nuevo plano; en cierto sentido, se asemejan a un imán gigantesco en movimiento rotatorio. Igual que sucedería con dicho imán, los protones emiten un pulso electromagnético oscilante, conocido como señal decreciente de inducción libre debido a que la precesión sincronizada de los espines da lugar a una señal electromagnética decreciente. Esta señal corresponde a la iniciación de la carrera; los ejes de los espines se encuentran ahora en un estado de orden dinámico.

Este orden va desapareciendo a medida que el tiempo transcurre. La disminución de la señal de inducción libre se debe, en parte, al hecho de que el campo magnético estático no tiene la misma intensidad a lo largo de toda la muestra. Dado que la frecuencia de precesión de los protones depende de la intensidad del campo externo, la velocidad de precesión de un protón situado en una región con un campo magnético más intenso será mayor que la de los otros. Los ejes de los espines se orientan según direcciones diferentes. Estos espines van girando gradualmente, de forma similar a lo que sucede con los corredores en la pista; los ejes de los espines de los protones cuyos movimientos de precesión sean más rápidos tenderán a apuntar en la dirección de los ejes de los protones cuyos movimientos de precesión sean más lentos [*véase la figura 5*]. El ángulo formado entre los ejes de dos espines cualesquiera orientados según direcciones diferentes se conoce como ángulo de fase; la magnitud del ángulo de fase constituye una medida de la desincronización de los ejes de los espines. Cuando los protones se desincronizan dejan de emitir el campo electromagnético oscilante, la señal decreciente de inducción libre. La muestra se encuentra ahora en un estado de caos aparente.

A continuación, la muestra se excita con un segundo pulso rf. Este pulso desempeña un papel similar al del segundo disparo de pistola del juez de la carrera. Dicho pulso tiene la misma frecuencia que la del primero, mas, en una experiencia típica, su duración es al menos doble que la del anterior; en consecuencia, el plano en el que se sitúan los ejes de los espines de los protones gira 180 grados, quedando de nuevo con una orientación perpendicular al campo constante. Todo sucede como si el plano donde están situados los ejes de los espines diera una vuelta completa hacia abajo o resultara reflejado en un espejo.

Tras la aplicación del primer pulso rf, los ángulos de fase entre los espines de movimiento de precesión rápido y de movimiento de precesión lento han ido creciendo. Justo después de aplicar el segundo pulso, que produce una inversión súbita del plano en el que se sitúan los ejes de los espines, los ángulos de fase entre los diferentes ejes son los mismos que los de antes, pero las posiciones relativas de los ejes con movimiento de precesión rápida y lenta se han invertido. En otras palabras, antes de que tuviera lugar el segundo pulso, los ejes de los espines con movimiento de precesión rápida estaban dirigidos más hacia adelante que los de los espines con movimiento de precesión lenta; una vez producido este segundo pulso, el plano donde se sitúan los ejes se ha invertido en el sentido de arriba abajo (como reflejado en un espejo) y los ejes de los espines con movimiento de precesión lenta están dirigidos algo más hacia adelante que los de los espines con movimiento de precesión rápida.

Los espines de los protones de precesión rápida están ahora detrás de los de precesión lenta, de forma análoga a lo que sucede en la carrera, en la que los corredores adelantados quedan rezagados después de efectuar el segundo disparo. Al igual que sucede en la pista, los ejes de los espines con precesión rápida irán adelantando poco a poco a los de precesión lenta y, al cabo de algún tiempo, los ejes se realinearán. En este momento, los átomos emitirán otro pulso de radiación, conocido por pulso de eco, poniendo de manifiesto la recuperación del orden aparentemente perdido.

En el efecto de eco de espín, se dice que los pulsos rf aplicados están en resonancia con los espines de los protones debido a que la frecuencia de los pulsos es exactamente igual a la frecuencia de precesión natural de los protones. Esta propiedad de la radiación resonante es la base de las técnicas de resonancia magnética nuclear (RMN), descubiertas independientemente, en 1946, por Edward M. Purcell, de la Universidad de Harvard, y por Felix Bloch, de la Universidad de Stanford. En la espectroscopía de RMN, el investigador excita una muestra con el fin de determinar las frecuencias de radiación capaces de provocar la inversión de los espines; cada frecuencia resonante corresponde a un espín nuclear único en un determinado medio nuclear. Por ejemplo, la intensidad del campo magnético local puede variar en las diferentes partes de una molécula debido a que las nubes electrónicas apantallan parcialmente a los núcleos respectivos de los campos externos. Cuando un técnico en RMN conoce las frecuencias de inversión del espín, puede determinar la composición química de la muestra. Los ecos de espín son de gran utilidad en las técnicas de RMN. Los campos

aplicados externamente se controlan para así determinar la ocurrencia de una frecuencia de precesión concreta en muestras de gran tamaño, incluso tan grandes como el cuerpo humano.

Existe otra forma de utilizar estos efectos de eco de espín en el estudio de las propiedades de diferentes sustancias. En nuestra analogía de la carrera, los corredores no la finalizarán simultáneamente si unos se han fatigado más que otros y han reducido el paso; en otras palabras, cualquier cambio de velocidad introduce un cierto desorden dentro del orden oculto. Un desorden de este tipo en una muestra atómica podría provenir de la existencia de colisiones entre átomos, interacciones magnéticas entre átomos vecinos o desplazamientos de los átomos de una región donde el campo magnético externo es intenso a otra región en la que dicho campo lo es menos, lo que daría lugar a un cambio en sus velocidades de precesión. Si el retraso entre los dos pulsos rf se hace mayor, el desorden al azar que aparece entre ambos pulsos aumentará y la señal de eco será más débil. En consecuencia, un físico o un químico pueden utilizar la intensidad del eco, o su tiempo de caída, como una medida de determinados procesos al azar en la materia: agitación térmica, movimiento interno o fluctuación de campos locales.

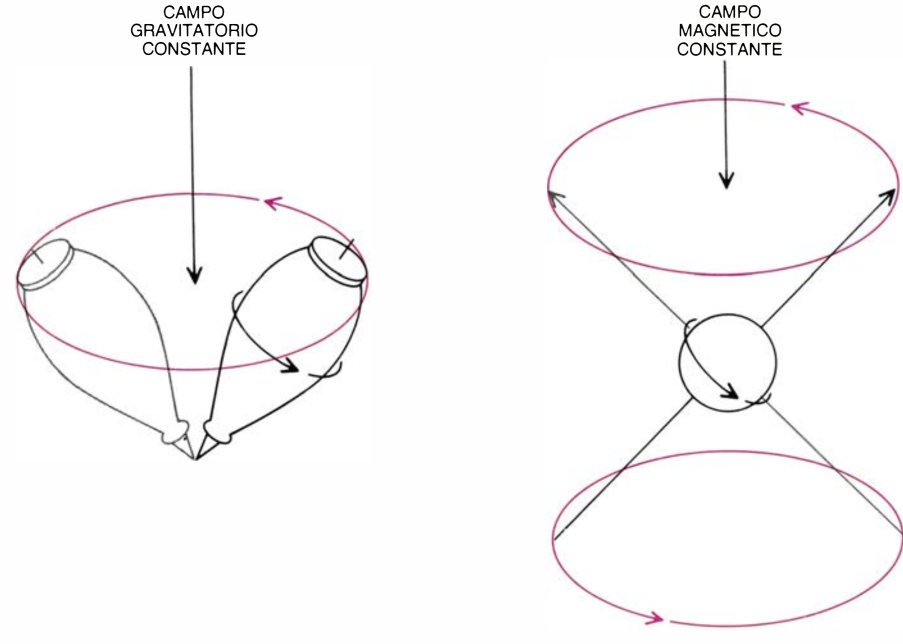
Gracias al desarrollo de la luz coherente de los láseres, Norman A. Kurnit, Isaac D. Abella y Sven R. Hartmann, de la Universidad de Columbia, generalizaron en 1964 la noción de eco a las frecuencias ópticas. Los principios físicos en los que se basan los ecos de espín y los ecos de fotones son los mismos: ambos casos son ejemplo de orden oculto producido y puesto de manifiesto por la radiación coherente. Sin embargo, el eco de espín involucra a los núcleos atómicos en tanto que el eco de fotones afecta generalmente a los electrones atómicos. Tal como demostraron Richard P. Feynman, Frank L. Vernon, Jr., y Robert W. Hellwarth, del Instituto de Tecnología de California, ambas situaciones se pueden describir mediante el mismo formalismo matemático, consistente en una generalización de las ecuaciones giroscópicas desarrolladas por Bloch.

Las experiencias mencionadas demuestran que el orden oculto existente en el interior de sistemas que diríanse desordenados se puede poner de manifiesto en determinados casos. Y se ha dicho también que ciertos fenómenos, tales como las colisiones moleculares, introducen elementos de desorden en el orden oculto, dando lugar a una disminución en la intensidad del eco. ¿Es posible diseñar experimentos de eco que anulen incluso estos efectos producidos al azar y aparentemente irreversibles?

Esta sugerencia parece contradecir la conclusión intuitiva según la cual las consecuencias a gran escala de ciertos sucesos al azar (las colisiones entre moléculas, por ejemplo) son en principio irreversibles. Sin embargo, en ese caso, la intuición es engañosa, dado que en algunas ocasiones se pueden eliminar hasta los efectos desordenadores de las colisiones elásticas moleculares. Este resultado se consigue aplicando un gran número de pulsos incidentes poco espaciados entre sí. Los ensayos de pulsos múltiples fueron llevados a cabo por vez primera en el marco de la RMN por Herman Y. Carr, hoy en la Universidad de Rutgers, y Purcell. Jan Schmidt, de la Universidad estatal de Leiden, Paul R. Berman, de la Universidad de Nueva York, y uno de los autores de este artículo (Brewer) extendieron más tarde dicho trabajo de los pulsos múltiples a la región óptica. A título de ejemplo, vamos a describir un experimento de eco de fotones en una muestra gaseosa.

El efecto del eco de fotones es, en principio, muy similar al eco de espín nuclear. En el eco de espín, el impulso rf incidente entra en resonancia con los ejes de los protones para alinearlos en un estado de orden dinámico. Este orden parece disminuir, pero queda restaurado por un segundo pulso rf resonante; este último produce una inversión de los ángulos de fase relativos de los protones, dando lugar a su realineación y originando un eco. El eco de fotones es análogo, excepto en el hecho de que la radiación incidente está suministrada por un láser (la radiación se sitúa en la región óptica) y en que la resonancia se produce con las oscilaciones de la nube de electrones que rodea a cada átomo de gas.

Los átomos de gas de un ensayo típico de eco de fotones se hallan en un estado de movimiento térmico caótico; se comportan como bolas de billar sometidas a colisiones elásticas, sus velocidades varían, pero no sus estados internos. Si los átomos se difunden elásticamente después de ser excitados por el primer pulso del láser, experimentan ciertas variaciones ligeras en sus trayectorias y velocidades. En virtud del efecto Doppler, la frecuencia de emisión de los átomos afectados varía de forma análoga a lo que sucede con el movimiento de precesión del eje de un protón. El conjunto de átomos ya no se encuentra en un estado de orden oculto. En la analogía de la pista de carreras, todo sucedería como si las colisiones entre los corredores cambiaran la velocidad de cada corredor. En el caso de la RMN, se produce el mismo tipo de proceso como consecuencia de que algunas moléculas de la muestra de líquido se difunden, al azar, hacia regiones donde la intensidad del campo magnético difiere.



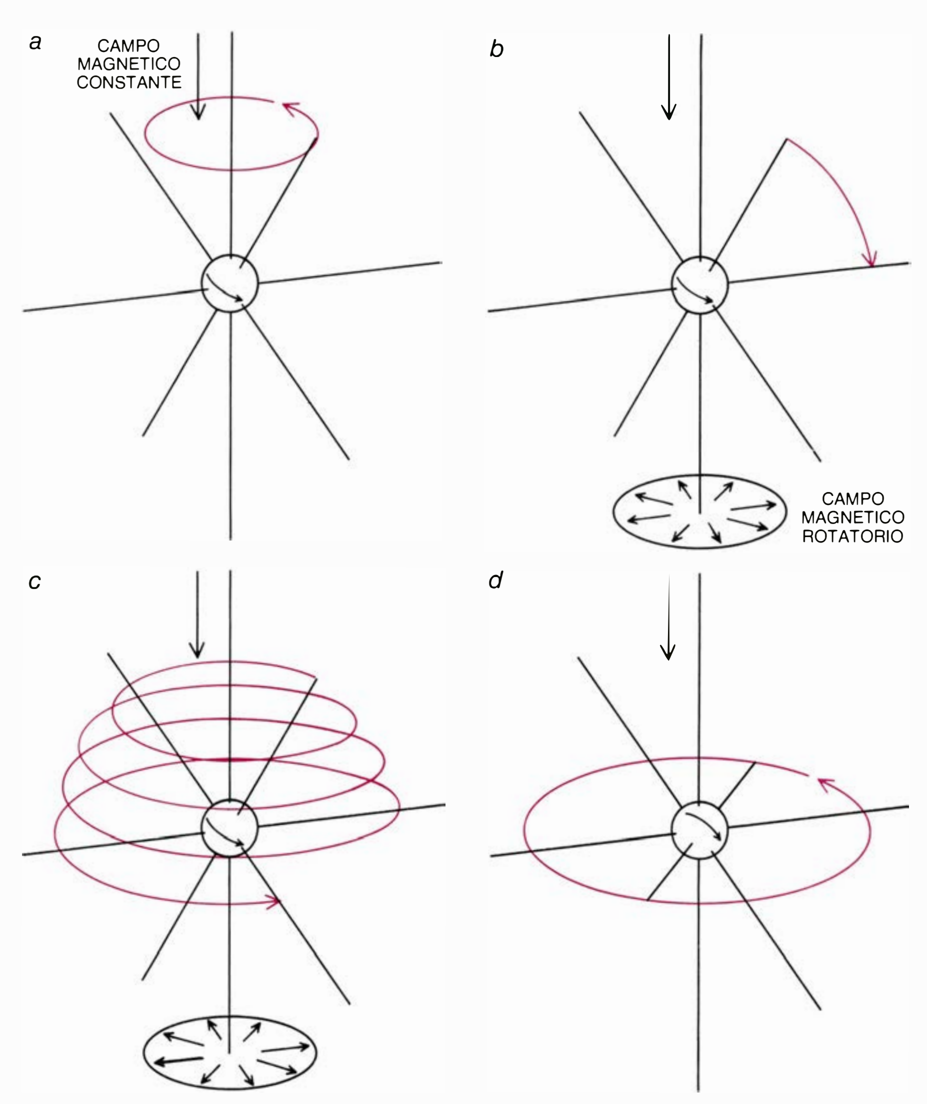
3. PRECESION DE UN GIROSCOPIO en un campo gravitatorio. Nos sirve de modelo de la precesión de un protón en un campo magnético. El extremo del eje de un giroscopio inclinado describe (*izquierda*) una circunferencia horizontal; este movimiento se denomina precesión respecto a una fuerza constante (en este caso, la fuerza de gravedad). De forma análoga, un protón (*derecha*), una partícula cargada con un espín intrínseco, efectúa un movimiento de precesión alrededor de un campo magnético constante.

Volviendo, una vez más, a la analogía de la pista de carreras, vamos a imaginar que el juez dispara la pistola muchas veces en rápida sucesión; en cada ocasión, los corredores cambian el sentido de su carrera. Incluso en el caso de que la velocidad de un corredor determinado haya cambiado ligeramente (debido a una colisión) entre dos disparos sucesivos, permanecerá alineado con el resto de los corredores cuando crucen la línea de salida, pues no se habrá desviado excesivamente de su posición "ordenada" durante el corto intervalo transcurrido entre los disparos.

Esta serie de inversiones múltiples tiene una consecuencia todavía más importante. Supongamos que la velocidad de cierto corredor aumenta ligeramente a raíz de una colisión. Este corredor recorrerá una distancia mayor por unidad de tiempo de la que habría recorrido si ningún otro corredor hubiera colisionado con él. Sin embargo, dado que el sentido en que se mueve este corredor se invierte repetidamente, su posición diferirá de la posición ordenada, primero en una dirección y luego en la otra, en igual cuantía. Por tanto, la distancia de separación media con respecto a dicha posición ordenada será igual a cero, lo que equivale a decir que el corredor en cuestión se mantendrá alineado con los otros corredores. En cierto sentido, todo sucede como si nunca se hubiera producido la colisión.

De forma análoga, si una muestra de gas se excita mediante una serie de pulsos muy poco espaciados entre sí, los desplazamientos Doppler producidos por las colisiones elásticas tendrán un valor medio igual a cero. La frecuencia emitida por un átomo que hubiera cambiado su velocidad diferiría de la frecuencia del átomo medio. Sin embargo, puesto que cada uno de los pulsos múltiples invierte la fase del átomo (de la misma forma en que cada disparo invierte el sentido de marcha de los corredores), la frecuencia de emisión del átomo será alternativamente mayor y menor que la media. En término medio, se puede afirmar que todos los átomos se excitan al unísono; al mantenerse éstos sincronizados, el efecto de las colisiones elásticas se minimiza.

Con posterioridad a la ocurrencia de una de estas series de pulsos múltiples, los átomos volverán a estar alineados, al igual que sucede con los corredores en el caso de disparos múltiples; cada vez que los átomos se alinean emiten un pulso de eco. La secuencia de pulsos múltiples desencadena una serie de múltiples ecos, cada uno de ellos entre un par de pulsos.

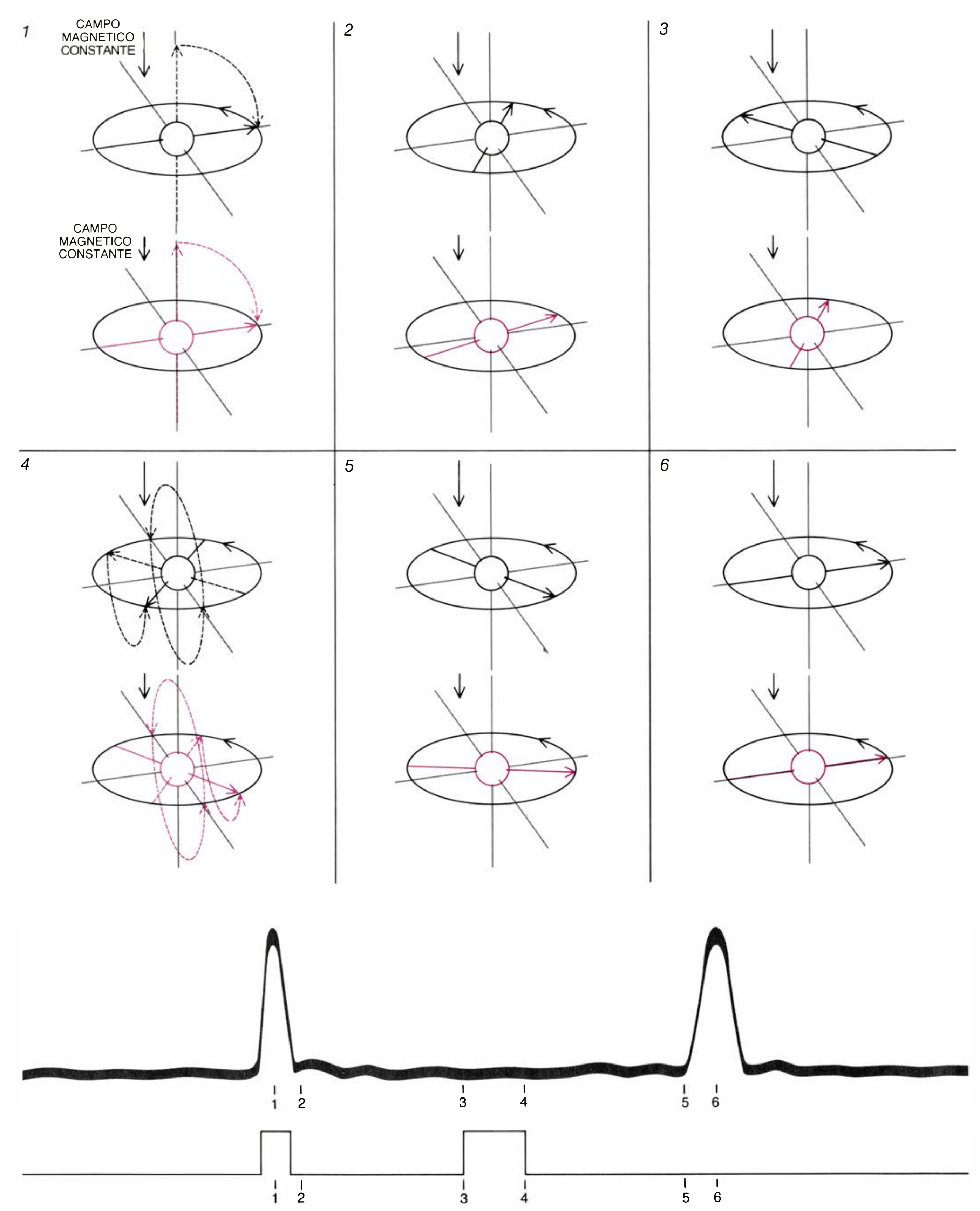


4. PRECESION DEL ESPIN DE UN PROTON sometido simultáneamente a un campo magnético constante y a un campo magnético rotatorio (circularmente polarizado); constituye la combinación de dos precesiones más simples. La primera es una precesión alrededor del campo magnético constante (a, *en color*). Si el campo rotatorio gira con una frecuencia igual a la de precesión del espín del protón, el ángulo entre ambos permanece constante; desde el punto de vista del protón, el campo rotatorio parece constante y el eje efectúa un movimiento de precesión hacia abajo con respecto a este campo horizontal (b, *en color*). La combinación de estos dos movimientos es una espiral descendente (c, *en color*). El campo rotatorio se desconecta cuando el eje del espín se encuentra en un plano perpendicular al campo constante; dicho eje continúa su movimiento de precesión alrededor de este campo (d, *en color*) y permanece en el plano.

La experiencia de pulsos múltiples de Carr-Purcell se traduce, en realidad, en un reforzamiento del efecto ordinario de eco. El experimentador aplica muchos pulsos con el fin de producir muchos ecos, prolongando así el estado de orden de la muestra.

Existe otro tipo de ensayo de pulsos múltiples que es aún más sorprendente. Conocido con el nombre de "eco de bocadillo mágico", este efecto fue demostrado, por vez primera, por John S. Waugh, junto con Won-Kyu Rhim y Alex Pines, que en aquel entonces eran alumnos suyos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. El efecto tiene lugar cuando se somete una muestra de material a una serie larga de pulsos especialmente procesados a fin de producir un eco simple. Lo que hay de especial en el eco de bocadillo mágico es que este efecto puede tener lugar en una muestra que en condiciones ordinarias no produciría ningún eco en absoluto. Sin la aplicación de este peculiar tren de pulsos, el estado de orden original de la muestra nunca se recuperaría.

En una experiencia típica de bocadillo mágico, se coloca un cristal de fluoruro de calcio en el seno de un campo magnético constante. Al igual que sucede en una experiencia de eco de espín, cuando se aplica a la muestra un pulso rf, los ejes de los espines de los núcleos de fluor se inclinan en 90 grados. El cristal emite, entonces, una señal de inducción libre, de forma similar a lo que sucede con una muestra lí-



5. EFECTO DE ECO DE ESPIN inducido mediante dos pulsos de radiofrecuencia (rf). Estos pulsos originan una inclinación de los ejes de los espines de los protones en una muestra de líquido sometida a un campo magnético constante. En la figura se representan dos protones; el campo magnético en la región del protón negro es más intenso que el campo en la región del coloreado. En (*1*), el primer pulso inclina los ejes de los espines hasta que éstos se sitúan en un plano perpendicular al campo constante, donde prosiguen su movimiento de precesión. Dado que el campo constante difiere de una región a otra de la muestra, el movimiento de precesión de algunos ejes será más rápido que el de otros; los ejes se orientarán según direcciones diferentes (*2*, *3*). Un segundo pulso rf, con una duración doble de la del primero, inclina el plano en el que los ejes de los espines desarrollan sus movimientos de precesión hasta que dichos espines se sitúan en el mismo plano en que se encontraban originalmente; sin embargo, las posiciones relativas de los ejes cuya precesión es más rápida y más lenta se han invertido (*4*). Los ejes de precesión más rápida caen ahora por detrás de los ejes de precesión más lenta (*5*). Al igual que sucede con los corredores más veloces, al cabo de algún tiempo dichos ejes coincidirán (*6*). Las dos imágenes del osciloscopio representan la secuencia de los pulsos rf (*arriba*) y las señales que proporciona la muestra cuando los protones se alinean (*abajo*), con su propio impulso de eco (*6*).

quida en una experiencia de eco de espín. Cuando la señal se ha extinguido totalmente, se aplica otro pulso de 90 grados, seguido por una serie larga de pulsos de 180 grados en rápida sucesión y, finalmente, otro de 90 grados. Este es el bocadillo al que se refiere la denominación de la experiencia: los dos pulsos de 90 grados representan el pan; las series de pulsos de 180 grados, el relleno.

No se dispone todavía de un modelo sencillo para describir lo que sucede en este efecto. De acuerdo con la descripción matemática generalmente aceptada, tan sólo puede afirmarse que el bocadillo mágico cambia el signo de la ecuación del movimiento de los números de flúor; en otras palabras, lo que se consigue, de hecho, es la inversión del momento que Loschmidt objetaba a Boltzmann.

Incluso en una experiencia en la que se utilizan pulsos múltiples, existe todavía alguna discriminación en la señal de eco; los ecos sucesivos son cada vez más débiles. En el caso de un gas, esta disminución se debe, fundamentalmente, a las colisiones inelásticas, colisiones de suficiente violencia como para producir cambios cuánticos irreversibles en los niveles energéticos de los átomos implicados. En consecuencia, la disminución del eco en una experiencia de pulsos múltiples constituye una medida de la frecuencia con que se producen colisiones inelásticas y difusiones en una determinada muestra. Esto significa que una experiencia de pulsos múltiples puede utilizarse para estudiar ciertos tipos específicos de interacciones atómicas sin la presencia molesta de otros procesos dinámicos concurrentes.

Existe otra forma de producir memoria atómica en la que no se requiere una inversión temporal. La idea básica aparece, una vez más, en la analogía de la pista de carreras. Todos los corredores podrían moverse con la misma velocidad radial y mantener su alineación original. Este es el caso más sencillo de todos; pero, ¿cómo conseguirlo?

En una muestra gaseosa, se pueden seleccionar todos los átomos que tengan una velocidad determinada excitando la muestra con un haz de láser, prácticamente monocromático y de onda continua, de la frecuencia adecuada de resonancia. En virtud del efecto Doppler, los átomos idénticos que se muevan con velocidades diferentes absorberán luz a frecuencias ligeramente distintas. Si la frecuencia del láser es espectralmente pura, es decir, si se trata de una frecuencia única, tan sólo los átomos con una velocidad determinada se seleccionarán y prepararán coherentemente. Volviendo a la analogía de la pista de carreras, todo sucede como si sólo se permitiera iniciar la carrera a los corredores que posean una velocidad determinada.

La alineación de estos átomos preparados coherentemente se puede poner de manifiesto con un aparato de láser con seleccionador de frecuencias: tras un largo período de excitación, la frecuencia del haz de láser se cambia de repente a un nuevo valor, de suerte que ya no exista resonancia con el grupo de átomos preparados. Este cambio termina con la excitación. Sin embargo, los átomos preparados coherentemente actúan ahora como un conjunto de diapasones idénticos que hubieran sido golpeados a la vez. Puesto que todos ellos poseen la misma frecuencia de resonancia, se refuerzan unos con otros y radian al unísono un haz de luz intenso y coherente en dirección hacia adelante. Este haz posee todas las propiedades de la luz de láser (coherencia, direccionalidad y frecuencia única) debido a que los átomos mantienen una memoria de sus estados ordenados. Esta es la analogía óptica del decrecimiento de inducción libre asociado con la resonancia magnética.

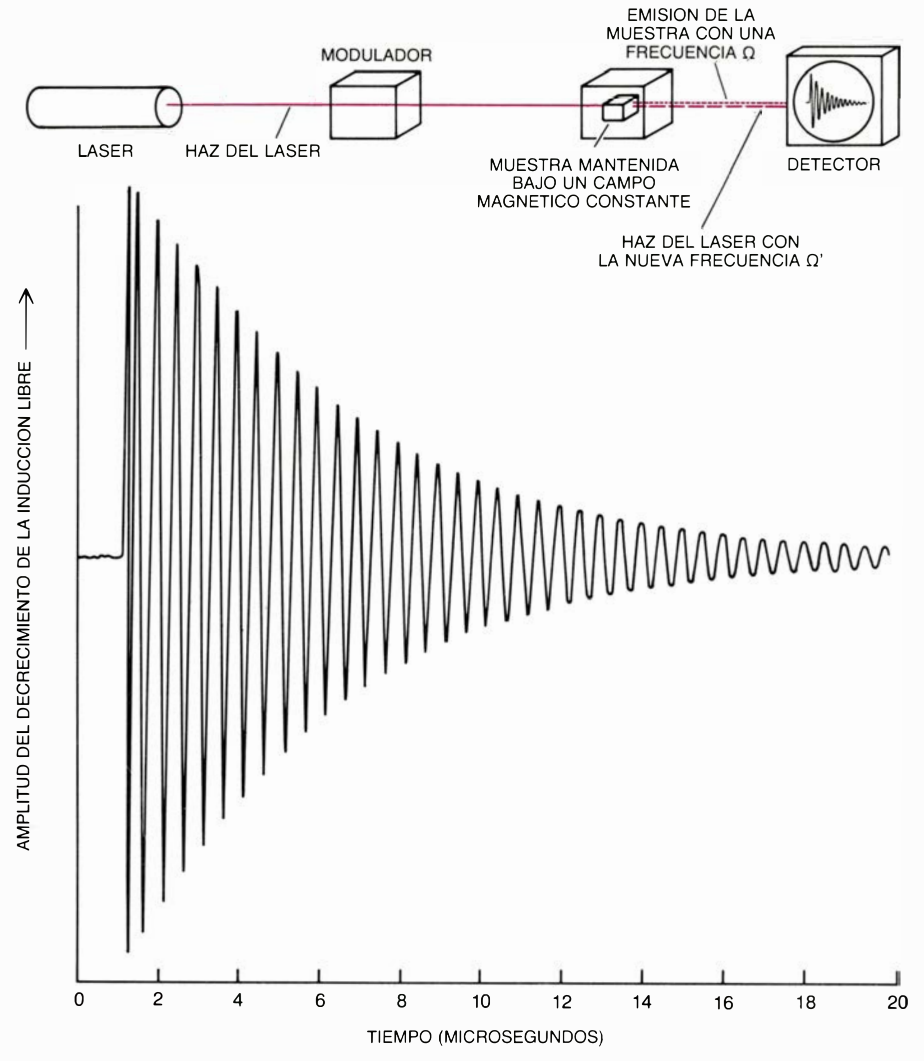
El efecto de decrecimiento de la inducción libre fue descubierto en la región de la radiofrecuencia de la RMN por uno de los autores (Hahn) y en la región óptica por el otro (Brewer) y Richard L. Schoemaker, este último en la Universidad de Arizona hoy. Al igual que sucede con el efecto de eco, el decrecimiento de la inducción libre permite que el físico o el químico mida propiedades de la materia que son muy difíciles de observar en condiciones ordinarias. Estudiando la disminución de diferentes frecuencias de emisión bajo condiciones dispares, se comprenden mejor las interacciones intermoleculares e intramoleculares de una determinada muestra.

El láser con seleccionador de frecuencias se desarrolló en el Laboratorio de Investigación de San José de la IBM por uno de los autores (Brewer), en colaboración con Azriel Z. Genack. Este dispositivo se ha utilizado no sólo para observar el decrecimiento de la inducción libre, sino también para estudiar una serie entera de fenómenos relacionados con la memoria atómica. El proceso de sintonización del láser con la resonancia de una determinada muestra atómica equivale, en cierto sentido, al proceso de aplicación de pulsos de luz de láser; en consecuencia, la aplicación de un láser a la resonancia de una muestra durante dos períodos de tiempo pequeños equivale, fundamentalmente, a la aplicación de dos pulsos de láser cortos y producirá el mismo fenómeno de eco. La técnica de selección de frecuencias permite controlar con gran precisión todos estos procesos mediante ciertos dispositivos electroópticos. Por otra parte, la interferencia entre la emisión de la muestra y la luz del láser (para esta nueva frecuencia) produce una señal muy intensa (heterodina); esta señal se puede utilizar para distinguir la emisión de la muestra de cualquier ruido de fondo.

Uno de nosotros (Brewer), junto con Ralph G. DeVoe, de la empresa IBM, han recurrido a la técnica de selección de frecuencias para examinar las ecuaciones giroscópicas fundamentales utilizadas por Bloch en su primera descripción de la RMN. De acuerdo con las ecuaciones de Bloch, la disminución de la memoria nuclear no debería depender de la intensidad de los campos aplicados. En el año 1955, Alfred G. Redfield demostró, utilizando argumentos termodinámicos, que estas ecuaciones requerían una modificación. Este autor observó la resonancia magnética nuclear de un metal puro y encontró que la aplicación de un campo de radiofrecuencia intenso puede aumentar la vida media de la memoria (es decir, reducir la velocidad de decrecimiento) mediante un efecto de promedio temporal similar, en cierto sentido, a una inversión temporal.

DeVoe y Brewer han extendido el argumento de Redfield a la región óptica. Para ello, han utilizado un láser ajustable de gran estabilidad (la frecuencia de emisión de este láser se ajusta a voluntad; una vez ajustado, dicha frecuencia es estable en cinco partes en 10.000 millones). DeVoe y Brewer utilizaron tal láser en una experiencia de decrecimiento de la inducción libre. La muestra examinada era un cristal de trifluoruro de lantano que contenía como impureza iones de praseodimio. El decrecimiento de memoria está originado por una interacción magnética nuclear entre dos núcleos próximos de praseodimio y flúor.

Al igual que sucede con los protones, los átomos de flúor se comportan como si se tratara de cargas que giran alrededor de sí mismas, con lo que crean su propio campo magnético. Los campos de los núcleos de flúor son lo suficientemente intensos como para inclinar los espines de los núcleos de flúor próximos, de forma análoga a lo que sucede cuando un pulso rf actúa sobre un protón. Cuando un núcleo de flúor se incli-



6. ESTE LASER DE FRECUENCIA VARIABLE fue utilizado por Brewer y Ralph G. DeVoe para observar otro tipo de efecto de memoria atómica. Un haz de láser de frecuencia Ω se utiliza para excitar la muestra de un cristal sometido a un campo magnético constante (*en el centro*). A continuación, la frecuencia del láser se ajusta a otro valor, Ω', con la ayuda de un modulador (*a la izquierda*). La propia muestra, resonando de acuerdo con el primer haz de láser, emite una radiación coherente, el decrecimiento de inducción óptica libre, con la frecuencia original Ω. La emisión de la muestra se combina con el haz del láser y produce una señal de interferencia en un detector adecuado (*a la derecha*). La duración de esta señal indica cuánto tiempo los átomos de la muestra han retenido la memoria del haz inicial.

na, el cambio resultante en el campo magnético local puede adquirir la suficiente importancia para inclinar otro núcleo de flúor próximo. Estas secuencias al azar de cambios en la dirección de los espines son frecuentes en los cristales de trifluoruro de lantano.

Cuando un cristal de trifluoruro de lantano se expone a la radiación coherente de un láser con la frecuencia de resonancia adecuada, los iones de praseodimio se sincronizan y emiten su propia radiación coherente, una señal de decrecimiento de la inducción libre. Los núcleos de flúor que sufren una inclinación al azar del espín desincronizan los iones de praseodimio próximos parando la emisión óptica.

DeVoe y Brewer midieron este tiempo de crecimiento utilizando la técnica del láser con selección de frecuencias que hemos descrito. Excitaron una muestra de trifluoruro de lantano con un láser dotado de selector de frecuencias; a continuación, procedieron a variar la frecuencia del láser de forma tal que ya no resonara con los iones de impureza del praseodimio. Esta técnica exige la utilización de un láser de frecuencia extraordinariamente estable, con el fin de excitar un intervalo de frecuencias muy estrecho. La anchura de línea del praseodimio es de sólo 10 kilohertz, es decir, unos 10 millones de veces menor que las primeras medidas ópticas en los sólidos. Una vez se ha desconectado la frecuencia del láser, el praseodimio emite la señal de inducción libre; esta señal desaparece en unos 17 microsegundos.

Es posible anular la interacción magnética entre el flúor y el praseodimio aumentando la intensidad del láser utilizado para excitar el cristal. Un aumento en la intensidad del láser aumenta la velocidad de transferencia, en los iones de praseodimio, entre los estados cuánticos más altos y más bajos al absorber y emitir fotones. Cada vez que un ion de praseodimio lleva a cabo uno de estos procesos de absorción y emisión, la interacción magnética nuclear entre él y los núcleos de flúor más próximos cambia de signo; en otras palabras, la interacción que había estado presente entre un ion de praseodimio y un núcleo de flúor actuará en la dirección opuesta después de que el ion de praseodimio haya absorbido y reemitido un fotón. En consecuencia, el núcleo de flúor responsable de que un ion de praseodimio se desincronice de los otros invertirá su efecto sobre dicho ion y le forzará a sincronizarse de nuevo. Este fenómeno es similar a la inversión del orden de fase producido por el láser en un ensayo de Carr-Purcell de pulsos múltiples. Si el intervalo de tiempo que separa dos inversiones del orden de fase es menor que el tiempo transcurrido entre los dos sucesos de desincronización (inclinaciones al azar de los núcleos de fluor), las perturbaciones producidas por los núcleos de flúor se compensarán debido a que sus interacciones con el praseodimio se invierten. Con Axel Schenzle, de la Universidad de Essen, y Masaharu Mitsunaga, de la IBM, DeVoe y Brewer han desarrollado una teoría cuántica microscópica de este fenómeno que, por primera vez, extiende los argumentos termodinámicos de Redfield a la región óptica del espectro.

Las técnicas de radiación pulsante de radiofrecuencia se basan en unos principios que se conocen desde hace más de 40 años. Estas técnicas proporcionan herramientas de gran importancia para la ciencia en lo relativo a la RMN y al análisis estructural de los compuestos químicos y el estado sólido. Con el desarrollo de láseres precisos y estables, estos métodos se aplican a la región óptica del espectro.

Estos fenómenos de memoria atómica hubieran encantado a Loschmidt, pues demuestran que algunos tipos de desintegración, incluso las producidas por colisiones al azar, se pueden invertir. Sin embargo, más allá de su atractivo filosófico, los fenómenos de memoria atómica pueden ser útiles. Eliminando los efectos de desintegración de ciertos procesos, los físicos pueden estudiar también otras interacciones con gran detalle, obteniendo una imagen más clara de la estructura y de las interacciones de la materia a escala atómica.

Reconocimiento mutuo entre neuronas embrionarias

Se buscan e interconectan con gran especificidad. En los embriones de insectos lo logran siguiendo sendas, marcadas en su superficie por moléculas específicas de reconocimiento

Corey S. Goodman y Michael J. Bastiani

El cerebro humano consta de cientos de miles de millones de células nerviosas, cada una de las cuales emite numerosas y largas prolongaciones que se entremezclan e interconectan con admirable especificidad. Uno de los principales misterios que le quedan por resolver a la biología es desentrañar cómo se interconecta el sistema nervioso durante el desarrollo embrionario. ¿Cómo logran las neuronas, las células nerviosas, encontrarse y reconocerse mutuamente para establecer las conexiones adecuadas?

Las estructuras que sirven de guía para el crecimiento de las fibras nerviosas fueron identificadas a fines del siglo XIX por Santiago Ramón y Cajal, pionero de la neuroanatomía. Se trata de extensiones ameboideas en forma de maza, situadas en el extremo de las fibras nerviosas, a las que Ramón y Cajal denominó conos de crecimiento. Cajal, y algo después Ross G. Harrison, de la Universidad de Yale, comprobó que el crecimiento de una fibra nerviosa no sigue un curso arbitrario: para encontrar y reconocer su objetivo, un determinado cono de crecimiento se extiende siempre a lo largo de una senda específica. De ello dedujeron ambos que los conos de crecimiento debían poseer una alta sensibilidad química y que sus objetivos estarían especificados químicamente. Esa idea se concretó, a principios de los años 60, en la hipótesis de la quimioafinidad, propuesta por Roger W. Sperry, del Instituto de Tecnología de California. Según Sperry, "la senda final seguida por cualquier fibra refleja la historia de una serie continua de decisiones, tomadas en razón de las afinidades entre los diversos filamentos de exploración que examinan el terreno circundante y los variados elementos que va encontrando cada uno".

En la última década, el conocimiento de la estructura de los conos de crecimiento y los mecanismos de su movimiento ha avanzado notablemente gracias a los estudios de cultivos "in vitro" de neuronas disociadas efectuados por Dennis Bray, del King's College de Londres, Paul C. Letourneau, de la Universidad de Minnesota, y Norman K. Wessells, de la Universidad de Stanford. Los conos de crecimiento emiten numerosas prolongaciones filamentosas, denominadas filopodios (los "filamentos exploratorios" de Sperry), que se alargan en muchas direcciones y exploran el entorno. Los filopodios son estructuras dinámicas; se extienden, mueven y retraen en cosa de minutos. Muchos de ellos establecen contactos con la superficie de otras células. Si un filopodio se adhiere débilmente a la superficie, se retrae hacia su cono de crecimiento. Si se adhiere con firmeza, persiste, y su contracción ulterior genera una tensión que conduce el borde dirigente del cono de crecimiento hacia el punto de adhesión. Así, aprovechándose de la adhesividad diferencial de sus filopodios, cabe dirigir a voluntad los conos de crecimiento, en cultivos de tejidos, hacia superficies concretas.

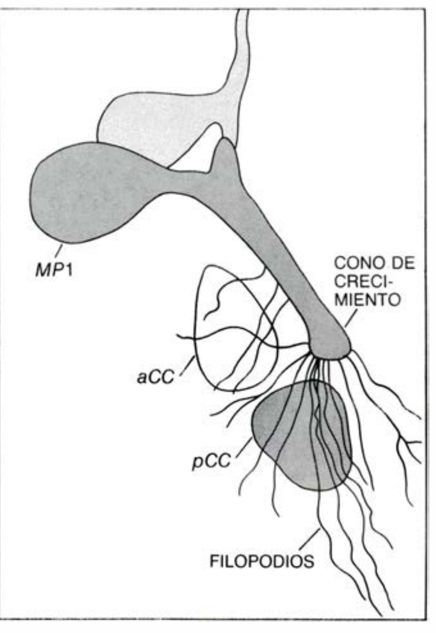
Las preguntas que planteábamos al principio pueden ahora formularse en términos más precisos. ¿Cómo se guían hacia sus objetivos los conos de crecimiento neuronal en un embrión en desarrollo? ¿Hasta qué punto los conos de crecimiento y los filopodios reconocen específicamente la superficie de otras neuronas durante el desarrollo y en qué grado están esas supeficies marcadas específicamente? ¿Cuál es el código molecular de los marcadores de superficie y cómo lo descifran los conos de crecimiento en desarrollo? Para responder a todo ello, muchos de los que, como nosotros, esperamos entender un día cómo se interconectan las neuronas del cerebro humano durante el desarrollo hemos empezado por estudiar los cerebros, mucho más sencillos, de organismos invertebrados. En Stanford hemos investigado el desarrollo de la especificidad neuronal en embriones de dos insectos: el saltamontes *Schistocerca americana* y la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster*.

El sistema nervioso central de estos y otros insectos comprende un cerebro (que tiene alrededor de 50.000 neuronas) y una cadena de ganglios segmentales, o grupos de células nerviosas, más simples, que reflejan la organización segmentada del animal. Cada ganglio tiene dos hemisegmentos (agrupaciones idénticas de unas 1000 neuronas), uno a cada lado del animal. Los ganglios están unidos entre sí por grandes haces de axones, denominados conectivos. (Los axones son las prolongaciones neuronales principales, que conducen los impulsos a las sinapsis, lugares de contacto y comunicación entre neuronas; las dendritas son prolongaciones generalmente más cortas, responsables en gran medida de la recepción de los impulsos.) En cada ganglio se distingue una delgada capa de cuerpos celulares cerca de la superficie ventral (inferior) y una región dorsal (superior), mayor, denominada neuropilo, donde todas las prolongaciones axónicas y dendríticas procedentes de los cuerpos celulares se entrelazan e interconectan sinápticamente. La mayoría de las 1000 neuronas de cada hemisegmento puede identificarse individualmente gracias a la forma exclusiva de sus axones y dendritas, y al patrón único de conexiones sinápticas que establecen con las prolongaciones de otras neuronas. Estas "neuronas identificadas" son las mismas en todos los individuos de una especie.

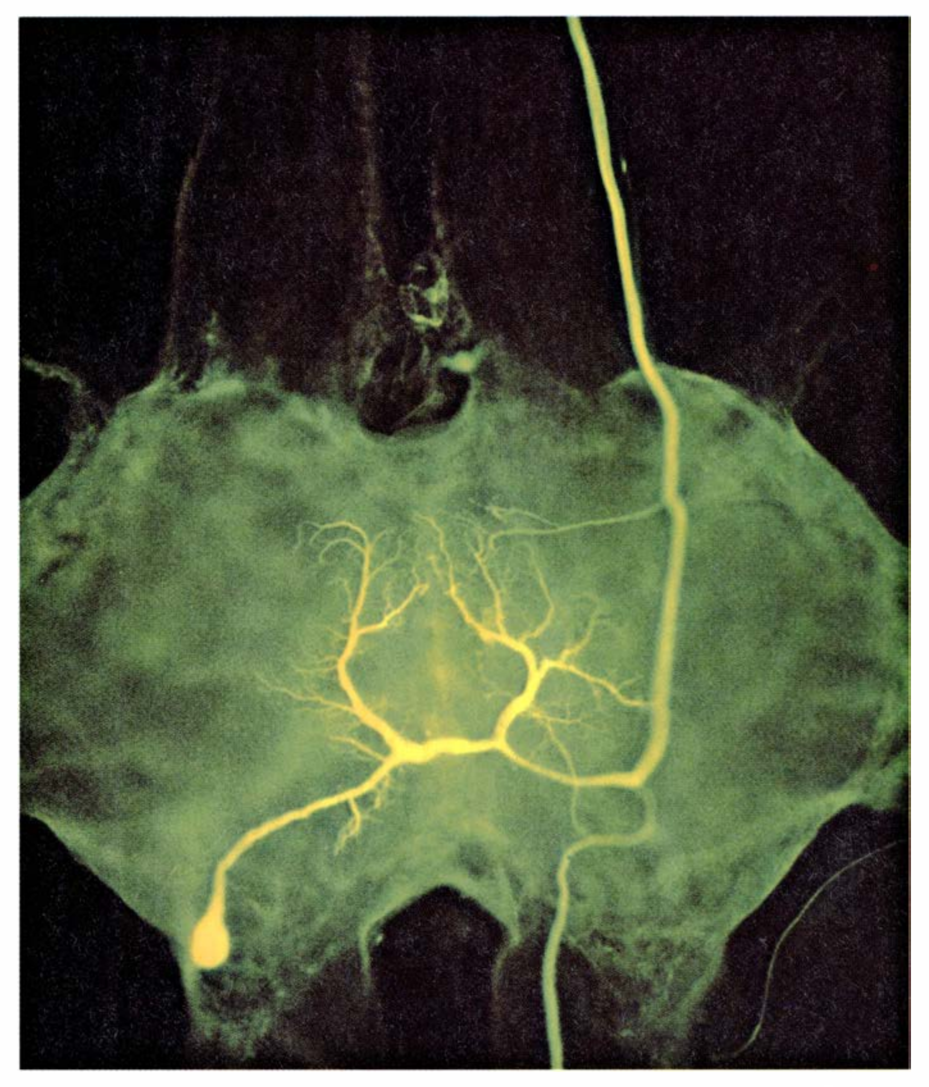
El del saltamontes es el sistema nervioso de insecto mejor conocido, debido al gran tamaño de sus neuronas. Pueden insertarse microelectrodos en esas células, sea para registrar impulsos nerviosos y determinar la conectividad sináptica, sea para inyectar un colorante que llene el cuerpo celular y sus prolongaciones y revele con gran detalle la estructura celular. Con este método, Keir G. Pearson y colaboradores, de la Universidad de Alberta, estudiaron dos neuronas identificadas del segundo ganglio torácico (*T*2), denominadas *C* y *G*. Esas dos neuronas constituyen un claro ejemplo de la variedad morfológica, estructural y de conexión que se advierte entre las 1000 neuronas de cualquier ganglio segmental. Así, la neurona *C* establece conexiones sinápticas con interneuronas y neuronas motoras específicas e interviene en el inicio del comportamiento saltatorio del insecto. En cambio, la neurona *G* desempeña una función de conducta muy distinta y establece conexiones sinápticas diferentes.

Tales diferencias de función y conectividad se reflejan en la peculiar morfología de cada neurona, cuya característica más notable son las sendas específicas que axón y dendritas siguen en el neuropilo. Por ejemplo, el axón primario de la neurona *G* de cada saltamontes se extiende a lo largo de un cierto tracto, o gran haz de fibras, mientras que sus dos dendritas primarias se extienden a lo largo de un par de tractos alineados simétricamente. Dos principios de organización surgen del estudio de neuronas identificadas en el saltamontes adulto. Primero, cada neurona extiende sus prolongaciones en tractos específicos, según un patrón característico de cada célula. Segundo, dentro del entorno definido por esos tractos, cada neurona establece conexiones sólo con un subconjunto específico de prolongaciones neuronales.

Estos principios tienen importantes consecuencias en el establecimiento de las conexiones del sistema nervioso del saltamontes durante el desarrollo. Al igual que en el adulto, el sistema nervioso del embrión de saltamontes está formado por células relativamente grandes y accesibles. Los ganglios segmentales se desarrollan a partir de un placodo, denominado neuroepitelio, que discurre de un extremo a otro del embrión. Dentro de esa región, algunas células se diferenciarán en células precursoras neuronales. En 1976, Michael Bate, actualmente en la Universidad de Cambridge, observó que en



1. CONO DE CRECIMIENTO de la neurona *MP*1 del saltamontes circunvalando la célula nerviosa *aCC* y encaminándose a reconocer la superficie de su objetivo: la neurona *pCC*. Para observar esta secuencia de pasos se inyectó a *MP*1 el colorante amarillo Lucifer, y a continuación se la visualizó con un anticuerpo anticolorante de tonalidad parduzca. La microfotografía, esquematizada a la izquierda, muestra cómo los filopodios filiformes que se ramifican desde el extremo del cono de crecimiento, guiando su curso, establecen, preferentemente, contactos selectivos con la neurona *pCC* en vez de con la *aCC* u otras neuronas de las muchas que hay en el entorno. Los filopodios probablemente contacten selectivamente con *pCC* porque reconocen una molécula marcadora en su superficie. Una prueba adicional del contacto selectivo la proporciona el fenómeno de conexión del colorante (*dye coupling*): el colorante inyectado a *MP*1 pasa a *pCC*, tornándola de color parduzco.



2. NEURONA revelada por la fluorescencia del amarillo Lucifer, en una microfotografía del segundo ganglio torácico del sistema nervioso central segmentado del saltamontes adulto. Se trata de la célula *G*, una "neurona identificada", esto es, reconocible en cualquier saltamontes por la forma y disposición de sus prolongaciones, axones y dendritas, y las conexiones que establece con otras neuronas. El cuerpo celular, en la parte inferior izquierda, es uno más de los alrededor de 2000 de que consta el ganglio. El axón primario cruza el ganglio, se extiende hacia delante (hacia arriba en la fotografía), mientras que otro axón secundario, más pequeño, avanza hacia la parte posterior del saltamontes. Dos dendritas primarias simétricas se extienden hacia delante a lo largo del centro del ganglio. En la fotografía, tomada por Keir G. Pearson y John D. Steeves, de la Universidad de Alberta, la neurona *G* está ampliada unas 100 veces.



3. PROLONGACIONES DE LA NEURONA *G* teñidas con amarillo Lucifer en una microfotografía, tomada asimismo por Pearson, de la sección transversal del neuropilo (región del ganglio donde se entremezclan e interconectan miles de axones y dendritas). En la región superior derecha se observa, dentro de un tracto (haz de axones y dendritas), la sección del axón primario de la neurona *G*. En la región inferior izquierda y en el centro se observan, discurriendo por tractos distintos, las dendritas simétricas.

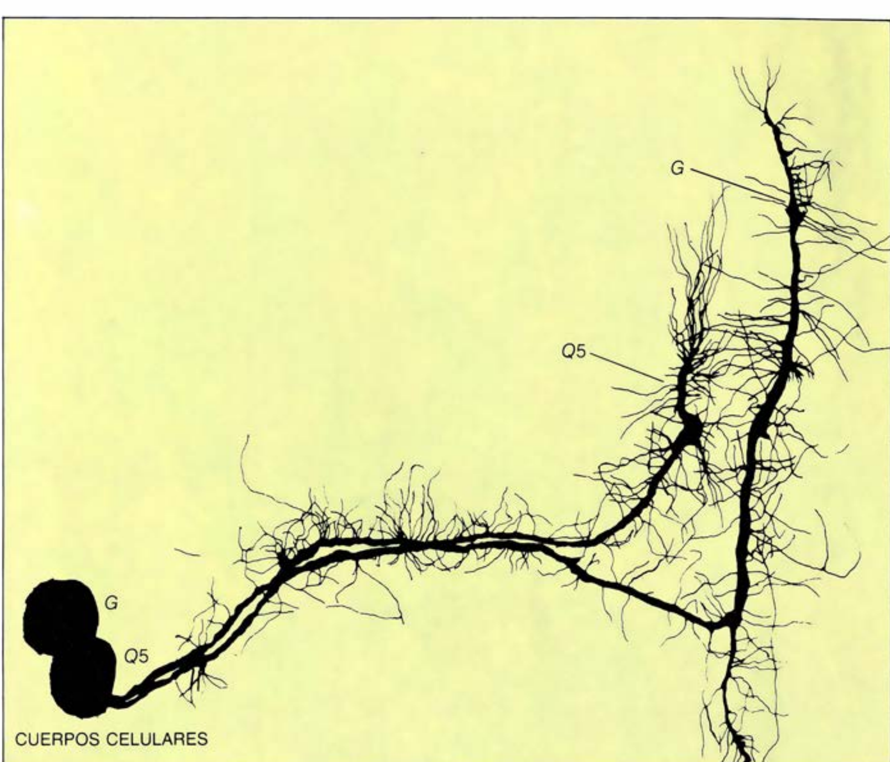
cada segmento del neuroepitelio aparecía un patrón muy característico de precursores neuronales. Un segmento típico posee dos placas laterales simétricas de 30 neuroblastos, ordenados en siete hileras de dos a cinco células por hilera, y un neuroblasto medio. Otras células precursoras, en número de siete, denominadas precursoras de la línea media, aparecen ordenadas a lo largo de esa línea.

Los precursores de la línea media se dividen sólo una vez, generando dos neuronas cada uno. Por contra, cada neuroblasto actúa a modo de célula basal, dividiéndose repetidamente en una cadena de células madre ganglionares, más pequeñas, que se dividirán a su vez dando dos células ganglionares que se diferenciarán en neuronas. Así pues, y en cada ganglio en desarrollo, un neuroblasto da origen a una familia de 6 a 100 descendientes neuronales. El patrón característico de las alrededor de 1000 neuronas identificadas en cada hemisegmento adulto se desarrolla a partir de un patrón, igualmente característico, de 30 neuroblastos.

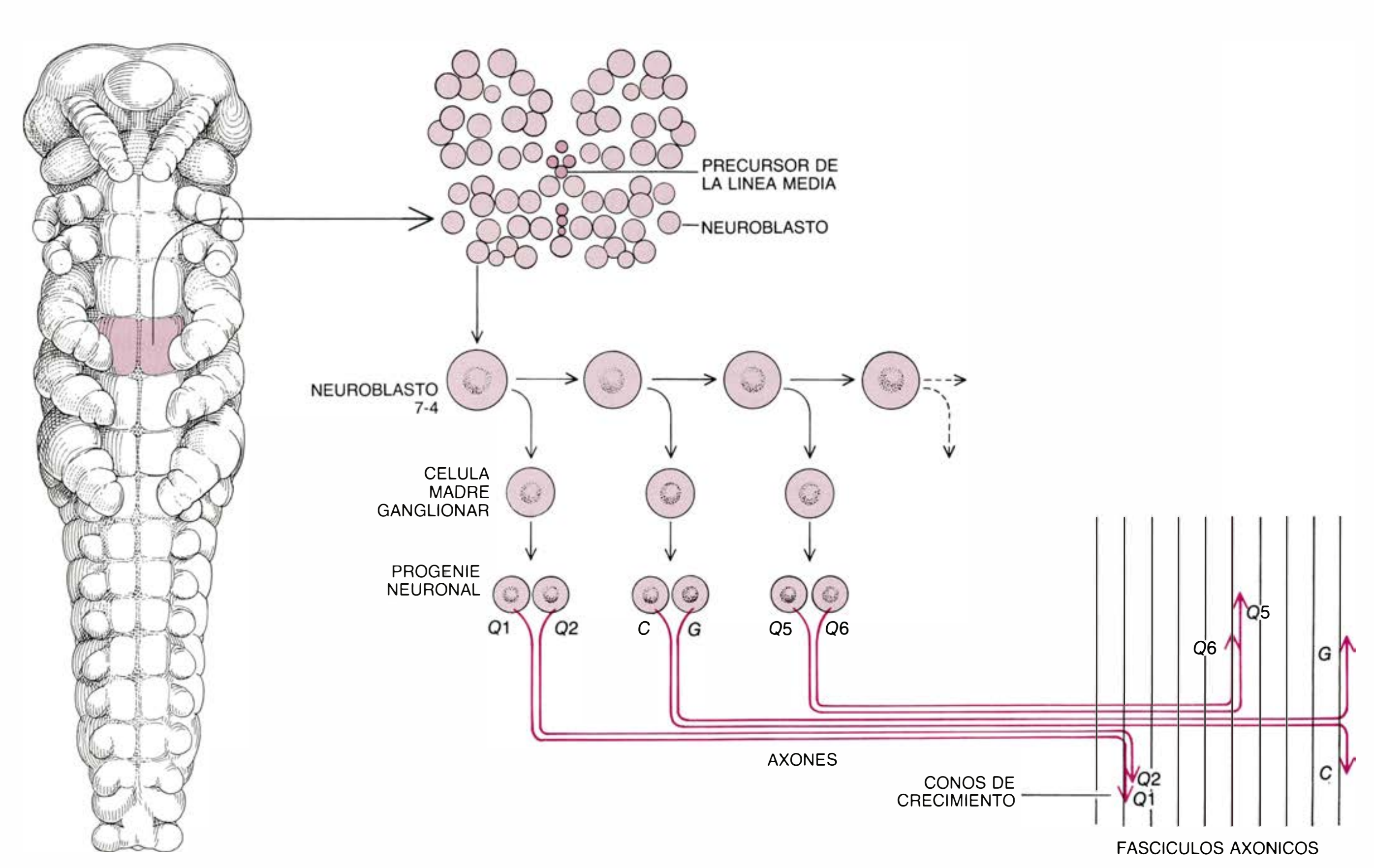
En 1977, Nicholas C. Spitzer y uno de nosotros (Goodman), a la sazón en la Universidad de California en San Diego, nos propusimos averiguar si el linaje celular determinaba algunos aspectos del destino celular. Nos preguntamos primero si ciertas neuronas identificadas surgían en bifurcaciones específicas de los árboles genealógicos neuronales. Para abordar el estudio habíamos de reseguir las neuronas desde su origen (la división de una determinada célula precursora) hasta el estadio en que exhibían su forma característica, reveladora de su identidad.

Mientras que los investigadores anteriores habían abordado el problema estudiando cortes seriados y fijados de embriones, nuestro grupo empleó un procedimiento que permitía aislar el neuroepitelio de un embrión y mantenerlo vivo en la platina del microscopio. El neuroepitelio es delgado y transparente, lo que permite observar las células, los axones e incluso algunos conos de crecimiento. Logramos identificar neuronas individuales y seguirlas, en el embrión vivo, desde su nacimiento hasta su madurez. Utilizando microelectrodos para inyectar colorantes en las células y sus prolongaciones describimos la descendencia y la secuencia temporal de diferenciación de la progenie inicial del neuroblasto medio. Demostramos que los neuroblastos producían familias características de neuronas identificadas.

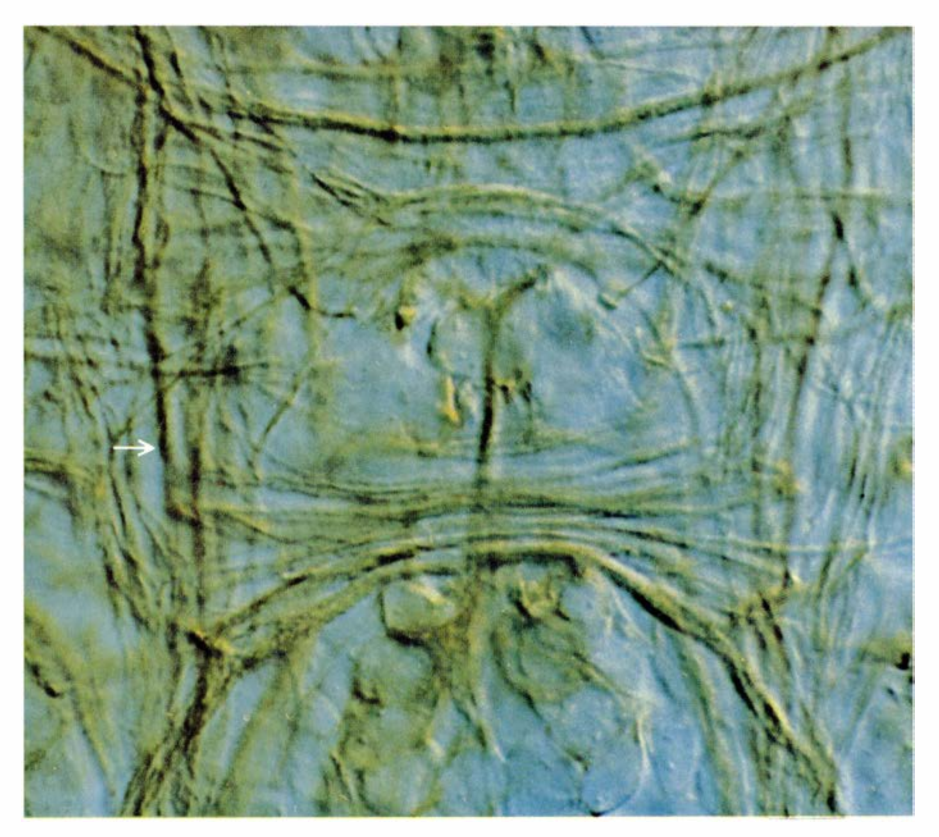




4. CONOS DE CRECIMIENTO del extremo dirigente de los axones de las neuronas *Q*5 y *G* (*izquierda*), extendiéndose a lo largo de sus sendas específicas. Se inyectó en ambas células peroxidasa de rábano, a la que se sometió luego a una reacción química que tiñó de marrón las células y sus prolongaciones. El dibujo (*derecha*), que cubre un campo mayor, muestra que los axones se originan en los cuerpos celulares y que los filopodios irradian desde los conos de crecimiento, explorando el entorno para reconocer la senda propia de cada cono de crecimiento. (La micrografía es de los autores.)



5. EMBRION DE SALTAMONTES (*izquierda*). Tiene 17 ganglios segmentarios, que presentan todos un patrón casi idéntico de células precursoras neuronales: 30 neuroblastos a ambos lados, un neuroblasto medio y siete precursores de la línea media. Los precursores de la línea media se dividen sólo una vez, produciendo dos neuronas cada uno; los neuroblastos se dividen repetidamente, generando células madre ganglionares, cada una de las cuales se divide a su vez en dos neuronas hermanas. El neuroblasto denominado 7-4 genera unas 100 neuronas, de las que mostramos aquí el origen de las seis primeras. El cono de crecimiento primario de cada una de esas neuronas sigue una senda específica tras reconocer un fascículo y unirse a él (*derecha*).



6. ARMAZON ORTOGONAL de fascículos axónicos de un segmento del embrión de saltamontes (vista dorsal). Consta, básicamente, de dos series de fascículos longitudinales (uno en cada lado), conectados por fascículos transversales que unen los dos lados simétricos, o hemisegmentos. En este estadio del desarrollo (ocho días, esto es, un 40 por ciento de desarrollo), unas 100 neuronas de cada hemisegmento han extendido sus axones asociándose entre sí hasta formar unos 25 fascículos longitudinales. La mayoría de los conos de crecimiento se encuentran en este entorno, rodeados por axones de otras neuronas.

El destino de tales neuronas tanto podía depender de su linaje (las sucesivas divisiones celulares del neuroblasto y de las células madre ganglionares de su árbol genealógico específico) como de su posición en el ganglio en desarrollo y de sus interacciones ulteriores con determinadas células vecinas. Para elucidar cuál de esas dos alternativas era la correcta decidimos eliminar la presunta célula precursora, o sus vecinas, y observar el efecto. Seguimos para ello un procedimiento desarrollado por John E. Sulston, del Consejo de Investigación Médica del Laboratorio de Biología Molecular de Cambridge, en el cual se eliminan neuronas individuales dirigiéndoles un microhaz de rayos láser. Los experimentos de ablación realizados por nuestros colegas Chris Q. Doe, John Y. Kuwada y Paul H. Taghert probaban que cuando un neuroblasto inicia su división, el linaje desempeña un papel fundamental a la hora de determinar su progenie directa: las células madre ganglionares. Sin embargo, las dos neuronas hermanas producto de la división final de cada una de las células madre ganglionares son en principio equivalentes; sólo adquieren su destino final por obra de las interacciones mutuas que se registran antes de la extensión de sus conos de crecimiento. En otras palabras, linaje e interacciones celulares contribuyen a determinar el destino único de cada neurona.

Tras delinear los acontecimientos iniciales del desarrollo neuronal cabe preguntarse qué sucede cuando las células empiezan la extensión de sus conos de crecimiento. ¿Cómo se reconocen las neuronas entre sí a medida que sus conos de crecimiento deciden las sucesivas sendas a seguir? Para averiguarlo estudiamos detalladamente, con Jonathan A. Raper, el desarrollo inicial de los seis primeros descendientes del neuroblasto denominado 7-4: las neuronas *Q1* y *Q2*, *C* y *G* (descritas antes en el adulto) y *Q5* y *Q6*. Los conos de crecimiento de estas neuronas eligen sendas específicas, divergentes, cuando el desarrollo alcanza el 40 por ciento. (El embrión tarda 20 días en desarrollarse, de manera que un día equivale al 5 por ciento de desarrollo.) Con Frances C. Thomas examinamos esas elecciones inyectando colorantes a las neuronas y reconstruyendo sus axones, conos de crecimiento y contactos filopodiales a partir de micrografías electrónicas de cortes seriados de tejidos embrionarios.

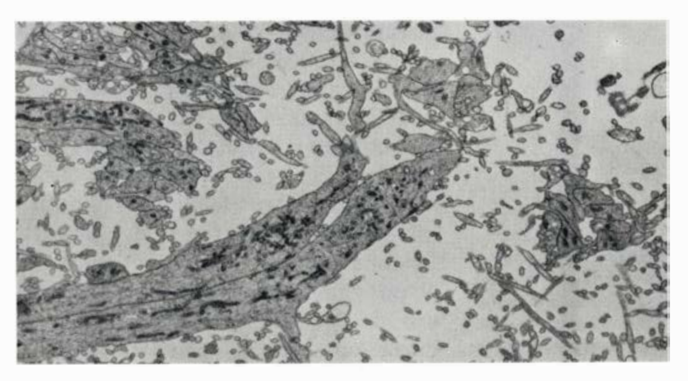
Los conos de crecimiento se hallan inmersos en un bosque de axones de neuronas ya diferenciadas, de las que alrededor de 100, en cada hemisegmento, han extendido ya en ese estadio sus axones hacia el neuropilo en desarrollo. Los axones se agrupan en fascículos, o haces, longitudinales y transversales. Dentro de cada segmento, esos fascículos forman un armazón ortogonal, aproximadamente cuadrado; la cadena de ganglios segmentales adopta, pues, un patrón en escalera. Los conos de crecimiento de los seis primeros descendientes del neuroblasto 7-4 se comportan, en principio, de manera similar: se extienden hacia el lado opuesto del neuropilo creciendo selectivamente (agavillándose) a lo largo de un haz transversal (o "peldaño") de axones. Sin embargo, alcanzado el lado opuesto del neuropilo, cada cono de crecimiento escoge el seguimiento de un fascículo longitudinal distinto.

En este punto de elección, el cono de crecimiento de la neurona *G* proyecta abundantes mechones de filopodios, que establecen contacto con las superficies de unos 25 haces axónicos distintos, de unos 100 axones cada uno en este estadio. Aunque el cono de crecimiento *G* está próximo a casi todas esas superficies neuronales, se une invariablemente a un haz específico compuesto por los axones de cuatro neuronas: *A*1, *A*2, *P*1 y *P*2. Dentro de este fascículo *A*/*P*, los dos axones *P*, íntimamente unidos, serpentean alrededor de los dos axones *A*. Sin embargo, la punta del cono de crecimiento *G* parece unirse siempre con los axones *P* y no con los axones *A*. Aparentemente, *G* no tan sólo es capaz de distinguir el fascículo *A*/*P* de los otros 25 fascículos, sino también los axones *P* de los *A* dentro de ese fascículo.

Los filopodios del cono de crecimiento de *G* son los primeros en reconocer los axones *P*, adhiriéndose selectivamente a su superficie y envolviéndolos. En este estadio, los filopodios se extienden a partir del cono de crecimiento y lateralmente, a lo largo de todo el axón. Curiosamente, se observó que los filopodios *G* reconocían dentro de la enmarañada red de filopodios que constituye la mayor parte del neuropilo embrionario, además de los axones *P*, también sus filopodios. Así pues, sea lo que fuere las señales de reconocimiento de las superficies neuronales, tanto parece darse en los filopodios como en los axones y conos de crecimiento.

CELULAS *P* LESIONADAS
HACES AXONICOS TRANSVERSALES
CONO DE CRECIMIENTO *G*
AXONES *A*
AXONES *P*
P2
P1
A1
A2
G
CONO DE CRECIMIENTO *G* RESIGUIENDO LOS AXONES *P*
SEGMENTO *T2*
NERVIO INTERSEGMENTAL
SEGMENTO *T3*
NERVIO INTRASEGMENTAL
FASCICULO *A/P*
CONO DE CRECIMIENTO Y FILOPODIOS *G* CONECTANDO CON LOS AXONES *P*
HACES AXONICOS LONGITUDINALES

7. FASCICULACION SELECTIVA del cono de crecimiento *G* con el haz *A/P* (compuesto de dos axones *A* y dos axones *P*), a lo largo de dos segmentos representados en distinto estadio del desarrollo. En el segmento inferior, los conos de crecimiento de las dos neuronas *G* simétricas (una en cada hemisegmento) han cruzado el neuropilo y están en el "punto de elección", donde seleccionarán un haz longitudinal con el que fascicular. Sus filopodios, una vez exploradas las superficies de unos 100 axones, agrupados en 25 fascículos, han contactado selectivamente con los axones *P*. Diez horas después, el cono de crecimiento *G* ha subido por el fascículo *A/P*, extendiéndose hacia delante (*arriba, a la izquierda*). Dentro del fascículo elegido, el cono de crecimiento se asocia específicamente con los axones *P*, y no con los *A*, de lo que cabe deducir que reconoce una molécula específica de superficie de las neuronas *P*. Así se confirmó en los experimentos de ablación realizados por Jonathan A. Raper, en los que se suprimía las neuronas *A* o *P* (o a ambas), impidiéndose el desarrollo de sus axones. Si se eliminaban sólo las *A*, el cono de crecimiento se extendía normalmente hacia adelante, agavillándose con los axones *P*. Sin embargo, de eliminarse las neuronas *P*, el cono de crecimiento *G* se ramificaba al azar, sin mostrar afinidad por ningún fascículo (*arriba, a la derecha*).





8. CONO DE CRECIMIENTO de la neurona *G* extendiéndose hacia el fascículo *A/P*, en una micrografía electrónica de una sección transversal del neuropilo, ampliada 4000 veces. El cono de crecimiento se suspende en el neuropilo por medio de los numerosos contactos filopodiales que establece con el fascículo. A las pocas horas, la punta del cono de crecimiento de *G* conecta con el fascículo, uniéndose estrechamente a los axones *P* y eludiendo los *A*.

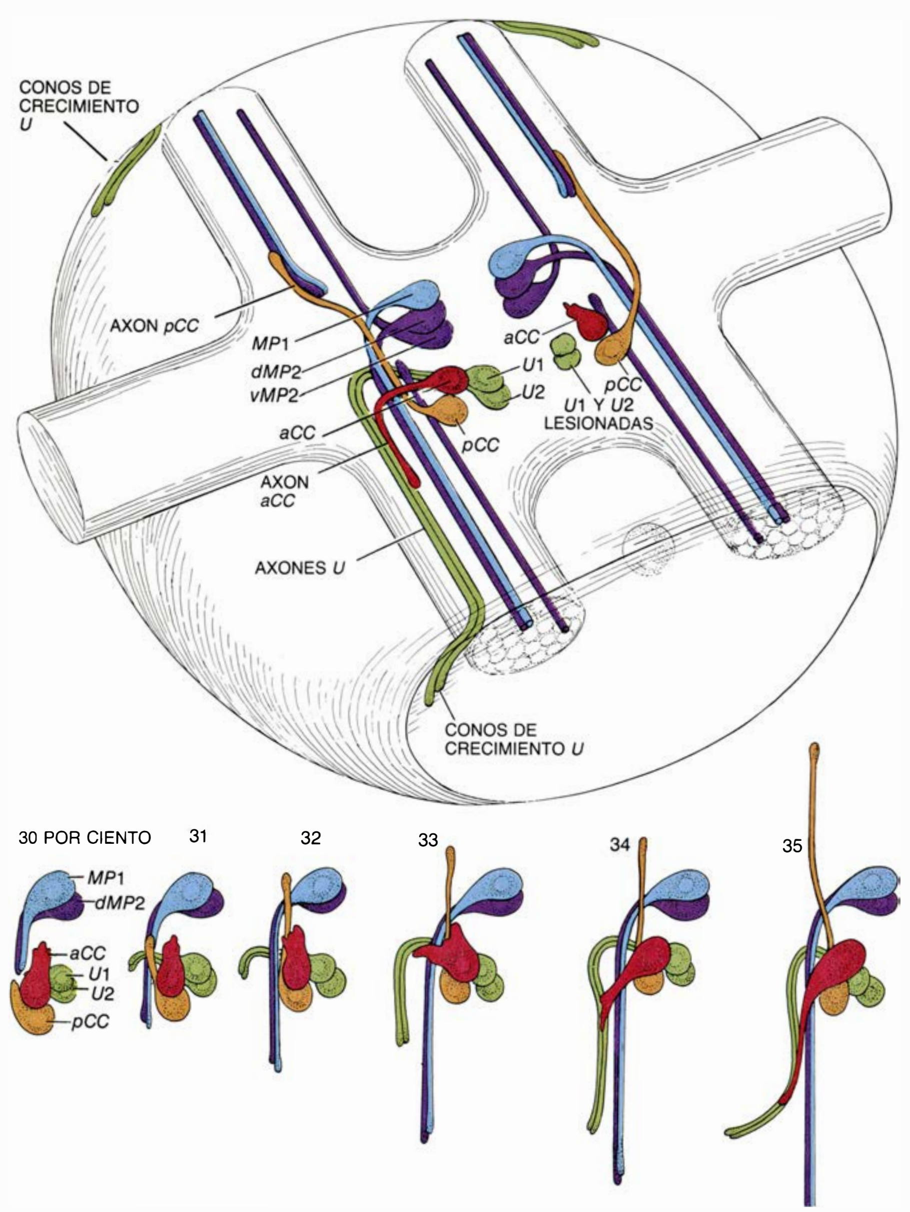
La fasciculación selectiva llevada a cabo por conos de crecimiento y filopodios cumple dos funciones en la interconexión del sistema nervioso embrionario. En primer lugar, los fascículos sirven de senderos que guían a los conos de crecimiento hacia regiones locales específicas del sistema nervioso. En segundo lugar, dentro del entorno definido por cada fascículo las neuronas eligen ulteriormente con qué vecinas establecen sinapsis. Al iniciarse el desarrollo, y antes de que el neuropilo se superpueble, las neuronas contactan y se reconocen entre sí a grandes distancias, a medida que sus filopodios van encontrándose. Tales contactos establecen patrones de fasciculación selectiva. Más tarde, cuando se forman las conexiones sinápticas, se reduce la distancia a la que las neuronas pueden interconectar, debido, probablemente, al mayor tamaño del neuropilo, a la densidad de sus prolongaciones y a la falta de espacio de exploración filopodial. En esas circunstancias, la capacidad de una neurona para elegir vecinas con las que conectarse queda reducida a su entorno más inmediato.

¿Cómo reconocen los filopodios a otras neuronas e identifican las sendas y objetivos previstos? A partir de nuestros estudios sobre la fasciculación del cono de crecimiento *G* propusimos, junto con Raper, la hipótesis de las sendas marcadas. Postulamos que los fascículos próximos en el neuropilo embrionario están marcados específicamente por "moléculas de reconocimiento" dispuestas en su superficie. Alcanzado el 40 por ciento de desarrollo, los filopodios *G* están próximos a unos 25 haces axónicos. En consecuencia, la hipótesis predice que el fascículo *A*/*P*, y particularmente los axones *P*, tienen un marcador de superficie que no poseen los demás haces longitudinales vecinos. Pusimos a prueba tal predicción eliminando selectivamente las neuronas *A* o *P*, o ambos conjuntos a la vez, y observando los efectos de esas supresiones en la conducta del cono de crecimiento de la neurona *G*.

Cuando se eliminan a la vez *A* y *P*, la mayoría de las alrededor de 100 neuronas del hemisegmento se desarrollan normalmente. Por contra, la neurona *G*, no. Sin el fascículo *A*/*P*, el cono de crecimiento *G* va sin rumbo, ramificándose anormalmente sin mostrar afinidad específica por los demás fascículos. Si eliminamos sólo los *A*, el cono de crecimiento se comporta normalmente, formando fascículo con los axones *P*. Sin embargo, si se eliminan sólo los *P*, no muestran afinidad hacia los axones *A* y no se agavillan.

Estos resultados denuncian que la mera proximidad de los axones no es el factor determinante principal ya que, incluso en ausencia de los axones *P*, los *A* se sitúan en idéntico lugar del armazón ortogonal. Asimismo, los resultados son contrarios a una determinación mediada por algún sutil mecanismo temporal. Por contra, el experimento apoya la idea de que la superficie del axón *P* posee una señal cualitativamente distinta de las que poseen cualquiera de los 100 axones próximos.

El cono de crecimiento *G* establece contacto con unos 25 haces axónicos, de los cuales uno al menos (el fascículo *A*/*P*) tiene dos componentes marcados distintamente. Así pues, en este estadio del desarrollo los axones de esa región del neuropilo estarían especificados por unas 25, o quizá 50, señales distintas de reconocimiento ubicadas en su superficie. Tan alto grado de especificidad, y un número tan elevado de posibles marcadores moleculares, nos hizo reflexionar. Pensamos que el estadio del 40 por ciento de desarrollo, con alrededor de 100 neuronas en interacción, quizá fuera excesivamente complejo para un análisis celular y molecular preciso. En consecuencia, decidimos analizar estadios anteriores.

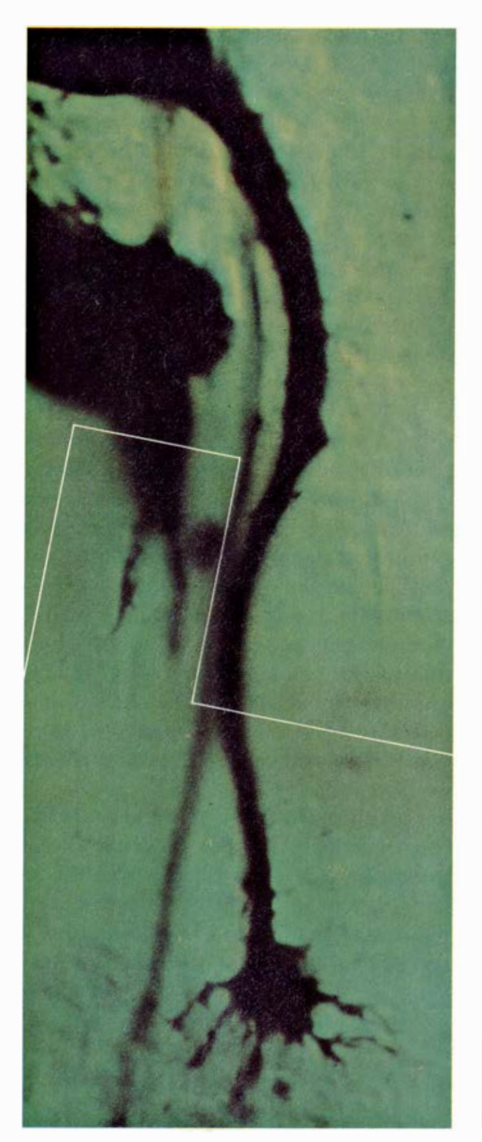


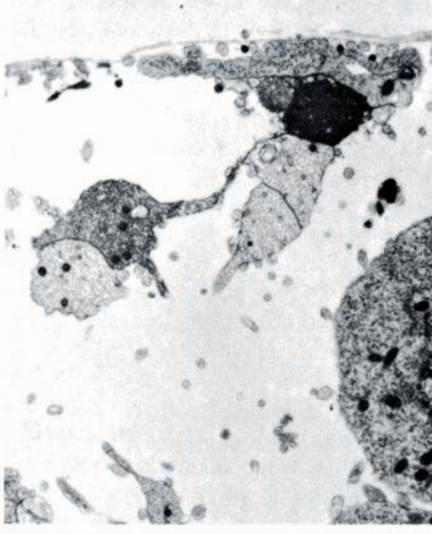
9. EN LAS PRIMERAS ETAPAS del desarrollo los tres primeros fascículos longitudinales toman cuerpo y los conos de crecimiento de las neuronas hermanas *pCC* y *aCC* eligen con quién unirse. El cono de crecimiento *pCC* forma fascículo rápidamente con los axones *MP*1 y *dMP*2 y se extiende hacia delante. Espera el cono de crecimiento *aCC*, señalando hacia delante, hasta que pasan cerca los dos axones *U*. Gira entonces hacia ellos y se les une a medida que éstos avanzan hacia la parte posterior del embrión, como se muestra a la izquierda y en la serie detallada de dibujos que representan seis estadios del desarrollo (*abajo*). Sascha du Lac observó que la eliminación de las dos neuronas *U* desconcertaba al cono de crecimiento *aCC*, que señalaba hacia delante y sin agavillarse, como se muestra en el dibujo superior, a la derecha. Aparentemente, esos haces axónicos precoces ya están marcados, y *pCC* y *aCC* los distinguen.

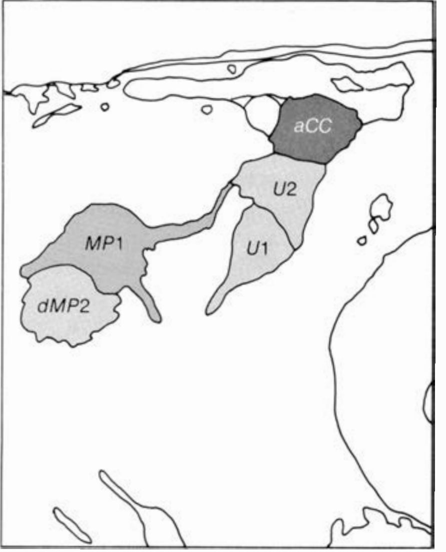
Nos interesamos seguidamente por el estadio del 30 a 35 por ciento, en el que los siete conos de crecimiento de esa región del embrión son capaces de distinguir sus respectivas superficies y, a través de interacciones específicas, fascicular selectivamente para formar los tres primeros haces axónicos longitudinales. Uno de los haces lo forma tan sólo el axón de la neurona denominada *vMP2*; otro contiene los axones de *MP1*, *dMP2* y *pCC*; el tercero comprende los de *U1*, *U2* y *aCC*. Juntamente con Sascha du Lac estudiamos las decisiones divergentes que tomaban los conos de crecimiento de las neuronas *pCC* y *aCC*, neuronas hermanas derivadas de una sola célula madre ganglionar.

Las superficies de esas neuronas hermanas deben estar marcadas distintamente antes ya de proyectarse sus conos de crecimiento. Que ello es así reveló al observar que el cono de crecimiento de *MP1*, que tiene igual acceso a ambas neuronas, se adhiere selectivamente al cuerpo celular de *pCC* y no al de *aCC*. La diferencia entre las dos células es aún más evidente cuando empiezan a extender sus conos de crecimiento. Así, a medida que se agavilla con los axones *MP1* y *dMP2*, el cono de crecimiento *pCC* se alarga hacia delante, mientras que el cono de crecimiento *aCC*, si bien señala hacia delante, no se alarga durante unas 10 o 15 horas. Pasado ese tiempo, y a medida que los axones *U1* y *U2* atraviesan la región al alcance de sus filopodios, parece reaccionar: gira, se mueve hacia los dos axones *U* y se une a ellos alargándose hacia atrás. Para comprobar la hipótesis de las sendas marcadas, du Lac eliminó con un microhaz de láser las neuronas *U1* y *U2*. Sin ellas, el cono de crecimiento *aCC* sigue señalando hacia delante, sin mostrar afinidad alguna por las otras cuatro superficies axónicas a su alcance. Igualmente, la eliminación de las neuronas *MP1* y *dMP2* deja al cono de crecimiento *pCC* inmóvil, apuntando hacia delante, y sin mostrar afinidad por los demás axones.

La exquisita especificidad mostrada por estos ejemplos, uno en el estadio del 40 por ciento y el otro en el estadio, mucho más simple, del 30-35 por ciento de desarrollo, nos convenció de que, en efecto, en la superficie de los axones embrionarios se expresa una gran variedad de moléculas de reconocimiento, y de que la adhesión selectiva de los filopodios para con los axones marcados guía a las neuronas en crecimiento hacia sus objetivos. Esta observación







10. AXON DE LA NEURONA *aCC* cruzando por encima de otros dos haces antes de agavillarse con el haz *U*. El montaje fotográfico (*izquierda*) corresponde a un embrión en el que a *aCC* (*borde superior izquierdo*), a *MP1* y a una célula estructural de la glía (*arriba, a la izquierda*) se les ha inyectado peroxidasa de rábano. El axón *aCC* cruza el axón *MP1* (*débilmente teñido*), se alarga paralelamente a él sin unirse a su haz, agavillándose con el haz *U* (*sin teñir*). La micrografía amplía la zona que marca la flecha.

nos llevó a predecir que los pequeños subconjuntos de neuronas cuyos axones establecen conjuntamente la fasciculación presentan moléculas de superficie comunes.

Un procedimiento para descubrir esas supuestas moléculas de reconocimiento consiste en inyectar células embrionarias en un ratón y esperar a que su sistema inmunitario produzca anticuerpos monoclonales contra todas las moléculas de la superficie celular. Los anticuerpos se unen específicamente a una sola de tales moléculas, sus antígenos. Ensayando miles de anticuerpos monoclonales cabe esperar que uno de los anticuerpos corresponda a una molécula cuya expresión temporal y espacial sea correlacionable con las decisiones realizadas por un cono de crecimiento específico. Tal molécula bien podría ser una de las que marcasen una senda específica. Decidimos trabajar con embriones de saltamontes del 40 por ciento de desarrollo. En este estadio, las células nerviosas no sintetizan aún neurotransmisores u otras proteínas propias de las neuronas completamente diferenciadas, siendo su principal actividad la de emitir conos de crecimiento y reconocer las sendas a seguir, de ahí que esperásemos obtener con cierta facilidad anticuerpos específicos contra moléculas de superficie implicadas en esas actividades.

Kathryn J. Kotrla inyectó en ratones el neuroepitelio de embriones del 40 por ciento, fusionó las células del bazo de ratón con células malignas de mieloma y ensayó la capacidad de los "hibridomas" celulares resultantes para sinte-

tizar anticuerpos contra antígenos neuronales de superficie. Tal como predecía nuestra hipótesis, encontró varios anticuerpos monoclonales que reconocían moléculas de superficie presentes sólo en pequeños subconjuntos de axones fasciculantes.

Dos de esos anticuerpos, denominados *Mes*-3 y *Mes*-4, se unen a moléculas de superficie que distinguen un único haz axónico longitudinal de los demás fascículos, tanto al 40 por ciento, cuando existen ya 25 fascículos diferentes, como al 33 por ciento, cuando sólo hay tres. En ambos casos, los dos anticuerpos reconocen el fascículo *MP*1/*dMP*2, aquel que, como antes describíamos, elige el cono de crecimiento *pCC* y no el *aCC*. En otras palabras, se demostró que un fascículo, de entre todos los que quedan al alcance de un cono de crecimiento, era antigénicamente distinto de los demás.

Hemos presentado aquí una imagen relativamente estática de un proceso de desarrollo que, de hecho, es dinámico e interactivo. Así, describíamos cómo en un determinado estadio el cono de crecimiento y los filopodios *G* muestran una afinidad selectiva para con los dos axones *P*. Sin embargo, en una fase más tardía del desarrollo, tres nuevos conos de crecimiento emergen del axón *G*. Dos de ellos se extienden anteriormente para tornarse en dendritas bilateralmente simétricas, mientras que el tercero se extiende posteriormente para transformarse en axón secundario. Estos nuevos conos de crecimiento fasciculan con haces diferentes, y en cada caso hay haces para los que el cono inicial de crecimiento no tiene afinidad alguna. Sin duda las afinidades de superficie de un cono de crecimiento de una neurona deben cambiar a lo largo del tiempo, probablemente a resultas tanto de las interacciones de los conos de crecimiento con otras células como del programa intrínseco de cada neurona. Por ejemplo, creemos que los cambios secuenciales de la afinidad superficial hacen que un cono de crecimiento cambie de un fascículo a otro a medida que se acerca a su objetivo final. Ahora bien, ¿cómo "sabe" la maquinaria biosintética de una célula dónde se halla el cono de crecimiento y con qué neuronas ha interactuado hasta ese momento?

La respuesta quizá se halle en la inserción selectiva de los filopodios, una interacción descubierta cuando buscábamos, en micrografías electrónicas, pruebas del contacto entre filopodios y superficies celulares específicas. Describíamos antes la adhesión selectiva de los filopodios *G* con las superficies de los axones y filopodios *P*. Y fue interesante descubrir que, a su vez, los filopodios de los axones *P* establecían contacto con el cono de crecimiento *G*. Aquéllos se insertan luego en este último, induciendo la formación de hoyos y vesículas revestidos, estructuras que suelen aparecer cuando se introducen moléculas en las células. La inserción es muy específica: si bien los filopodios de otros 40 conos de crecimiento cercanos establecen contactos con la superficie del cono de crecimiento *G*, ninguno de ellos se inserta en él. Creemos que tal inserción filopódica quizás induzca un cambio en la expresión de las moléculas de superficie del cono de crecimiento *G*. Y quizá lo haga enviando una señal hacia el cuerpo celular *G*, donde se sintetizan estas moléculas; informaría la señal algo así como "tu cono de crecimiento encontró los axones *P*; prepárate para la próxima decisión".

Un experimento que emplea anticuerpos monoclonales demuestra este tipo de cambio de especificidad. El anticuerpo *Mes*-2 reconoce un antígeno que se expresa en la superficie de tan sólo cuatro de las 1000 neuronas de cada hemisegmento (dos neuronas motoras y dos interneuronas). Es más, ese antígeno se expresa sólo temporalmente, en cierto estadio de la embriogénesis. Las neuronas motoras en cuestión se denominan *FETi* y *SETi*. Sus axones fasciculan conjuntamente fuera del sistema nervioso central, yendo a inervar idéntico músculo de la extremidad. Y aunque las dos neuronas motoras proceden de distintos neuroblastos, son las únicas de su familia que comparten la misma senda axónica final y expresan el antígeno *Mes*-2.

Cuando el cono de crecimiento del axón *FETi* y el axón *SETi* se encuentran en el límite del sistema nervioso central, ni se agavillan ni expresan el antígeno *Mes*-2. No obstante, algo más tarde, y después de establecer contacto con otras varias células, cono de crecimiento y axón se encuentran de nuevo, a una distancia considerable, en el esbozo de la extremidad en desarrollo. Esta vez, su comportamiento es muy distinto: el cono de crecimiento *FETi* fascicula con el axón *SETi* y juntos se extienden hacia el músculo objetivo. Observamos que poco antes de este segundo encuentro el antígeno *Mes*-2 se expresa en ambas neuronas y, algo más tarde, cuando los dos axones llegan al músculo común y lo inervan, la expre-

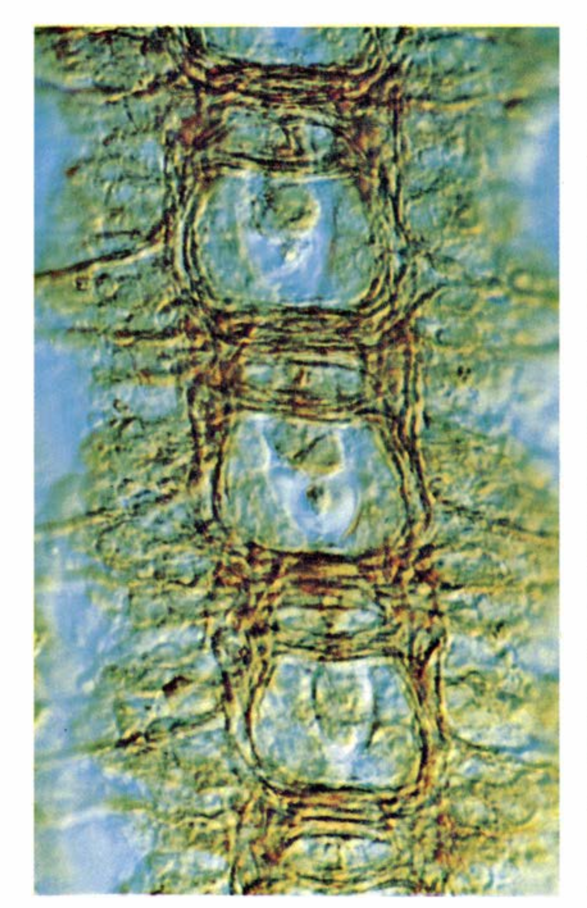
11. ESQUEMA DE LAS SENDAS DIVERGENTES elegidas por los conos de crecimiento de algunas neuronas identificadas de un hemisegmento. En este estadio del desarrollo, unas 100 neuronas (de las que mostramos 26) han extendido ya sus axones. Los 100 axones se agrupan en 25 fascículos axónicos longitudinales, de los que se indican 10. Los círculos corresponden a cuerpos celulares y, las flechas, a conos de crecimiento de axones primarios. El diagrama cubre parte de dos segmentos, por lo que algunas neuronas están representadas más de una vez. Las neuronas emparentadas (las procedentes de la misma célula precursora) se muestran aquí con idéntico color y, a pesar de su linaje común y de estar inmersas en un mismo entorno, divergen a menudo para seleccionar fascículos distintos del neuropilo en desarrollo.

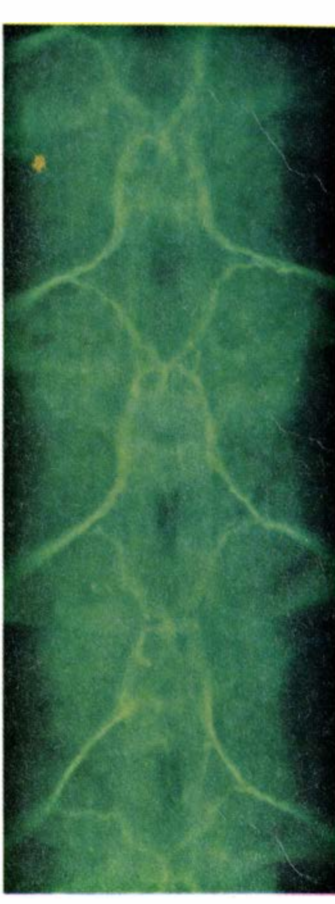
sión del antígeno *Mes*-2 decrece bruscamente y el antígeno desaparece.

Nos animó extraordinariamente descubrir, por un lado, la localización del antígeno en sólo cuatro superficies neuronales y, por otro, lo temporal de su expresión, pues ello reflejaba el grado de especificidad predicho por la hipótesis de las sendas marcadas. A la vez, empero, era frustrante constatar las dificultades que habríamos de superar para aislar una molécula tan efímera y comprobar su función. Al efecto habría que identificar el gen que la codifica y estudiar y manipular su expresión con técnicas de genética molecular. Resultaría ello más difícil aún al tratarse del embrión de saltamontes, un insecto cuya estructura genética no se ha estudiado suficientemente. Decidimos entonces trabajar con embriones de *Drosophila*, género mucho más accesible a la genética molecular.

A diferencia del saltamontes, la mosca del vinagre posee lo que los biólogos denominan "genética superior": sus genes y su expresión se han estudiado detalladamente desde 1920 y se conocen miles de cepas mutantes, que han permitido correlacionar genes con sus funciones. Los estudios genéticos de la mosca del vinagre, especialmente los realizados por Seymour Benzer, del Instituto de Tecnología de California, y sus colegas y alumnos, han contribuido de manera importante al conocimiento del desarrollo del sistema nervioso. Sin embargo, el pequeño tamaño y la inaccesibilidad de las neuronas embrionarias de *Drosophila* han impedido estudiar el reconocimiento celular y la especificidad neuronal en el nivel de resolución alcanzado en el saltamontes.

Ello no obstante, hemos logrado miniaturizar los métodos desarrollados para el embrión de saltamontes y aplicarlos al desarrollo de *Drosophila*. En colaboración con John B. Thomas y con Bate, de Cambridge, observamos que el sistema nervioso central del embrión temprano de la mosca es una réplica en miniatura del característico del saltamontes, con un grado de semejanza sorprendente. Existe homología entre las neuronas identificadas en ambos embriones; sus conos de crecimiento se extienden en direcciones idénticas y fasciculan igualmente a medida que avanzan por un armazón parejo de haces axónicos en escalera. Existe asimismo una neurona *G* en *Drosophila*, y su cono de crecimiento cruza el neuropilo a lo largo de un haz axónico transversal, girando luego an-





12. EL PATRON ORTOGONAL de los haces axónicos del saltamontes se repite en la mosca del vinagre *Drosophila*. En la microfotografía de un embrión de mosca de 12 horas, marcado con un anticuerpo contra la proteína axónica tubulina, se observan tres segmentos idénticos (*izquierda*). Un anticuerpo monoclonal, obtenido por Stephen L. Helfand, se une a una molécula sólo existente en un subconjunto de neuronas embrionarias de la mosca del vinagre. Aplicado a un embrión de 12 horas, y marcado indirectamente con un colorante fluorescente, el anticuerpo localiza el axón *aCC* y otros que se agavillan con él a medida que, extendiéndose por el nervio intersegmental, abandonan el sistema nervioso central (*derecha*).

teriormente a lo largo de un haz longitudinal. Observamos que este haz longitudinal posee dos axones *P* y dos *A*, y que la punta del cono de crecimiento *G*, tal como sucede en el saltamontes, establece contacto específicamente con los *P*. Estos y otros muchos resultados sugieren que el patrón inicial de reconocimiento celular se ha conservado notablemente a lo largo de la evolución de los insectos.

La posibilidad de estudiar neuronas identificadas, conos de crecimiento y patrones de fasciculación en el sistema nervioso central del embrión de *Drosophila* permite aplicar anticuerpos monoclonales, técnicas de ADN recombinante y análisis genético para desentrañar los mecanismos del reconocimiento celular y la especificidad neuronal. En nuestro laboratorio, Stephen L. Helfand ha obtenido anticuerpos monoclonales que reconocen pequeños subconjuntos de axones fasciculantes. Por ejemplo, un anticuerpo se une específicamente a una molécula que se expresa en unos cuantos axones que se unen a un solo haz: la versión, en *Drosophila*, del fascículo *U* del saltamontes. Este anticuerpo distingue las neuronas *aCC* de las *pCC*, como cabría esperar a partir del análisis celular del saltamontes. En consecuencia, el antígeno que reconoce es un candidato primordial para el papel de molécula de reconocimiento celular implicada en la fasciculación selectiva.

Con Stephen T. Crews, Denise M. Johnson, Linda McAllister y John Thomas estamos utilizando esos anticuerpos y otras sondas moleculares para aislar los genes que codifican las moléculas de reconocimiento celular. A la larga, el conocimiento de los mecanismos que controlan el reconocimiento celular de las 10 a 100 neuronas en los embriones del saltamontes y la mosca del vinagre proporcionará un modelo aplicable a los 1000 pares de neuronas que acaban desarrollándose en cada ganglio segmentario de un insecto, y quién sabe también si a los miles de millones de neuronas que conforman el sistema nervioso de los mamíferos.

Ciencia y sociedad

Inquietos Pirineos

Los conocimientos relativos a la estructura interna de la cordillera Pirenaica, a su evolución reciente y a su situación geotectónica actual han aumentado considerablemente en los últimos años. A ello han contribuido en gran medida las investigaciones geofísicas, principalmente sismológicas, iniciadas a mediados de los años 70, que han permitido precisar y completar los estudios geológicos llevados a cabo a lo largo de casi un siglo.

Resumiremos aquí los trabajos de sismología efectuados en los Pirineos, destacando cuáles son sus resultados más significativos y en qué medida condicionan los tipos o modelos de evolución y orogénesis de esta cordillera propuestos tradicionalmente por diferentes escuelas geológicas.

Conviene indicar, ante todo, que los Pirineos constituyen una cordillera intracontinental de tipo alpino, puesto que su orogénesis o proceso de formación más destacado tuvo lugar durante el ciclo alpino, hace unos 30 millones de años. A primera vista, su estructura geológica es bastante simple (si se compara, por ejemplo, con los Alpes) ya que sus elementos están dispuestos esencialmente en dirección este-oeste. Pueden distinguirse dos regiones principales: la Zona Axial Primaria (ZAP) en la que afloran materiales antiguos, paleozoicos, y en donde se dan los mayores relieves, y la Zona Nor-Pirenaica (ZNP), compuesta en su mayor parte de sedimentos secundarios o mesozoicos. Ambas zonas están separadas por la Falla Nor-Pirenaica (FNP), accidente geológico continuo a lo largo de los Pirineos orientales y centrales, pero cuya traza superficial se pierde en los Pirineos vasco-navarros. La ZAP y la ZNP, a su vez, cabalgan hacia el sur y el norte sobre la depresión del Ebro y la cuenca de Aquitania, respectivamente, regiones compuestas por terrenos más recientes, terciarios y cuaternarios.

Algunos trabajos sismológicos puntuales se empiezan a llevar a cabo en los Pirineos en los años 60, sobre todo en su parte oriental, aprovechando explosiones marinas en el golfo de León. Pero no se obtienen conclusiones significativas debido a la escasez de datos y a la complejidad de la estructura interna.

A mediados de los 70 se hace patente la necesidad de dedicar un esfuerzo importante para establecer la estructura profunda de la cadena, como elemento esencial para progresar en el conocimiento geodinámico de la misma. Entre los métodos geofísicos posibles, la sismología y, en particular, la técnica de perfiles sísmicos o sísmica de refracción aparece como la más adecuada, teniendo en cuenta la cantidad y calidad de información en relación con el coste total de la operación.

Repasemos brevemente este método. Es sabido que las ondas sísmicas generadas por un terremoto o una explosión subterránea se propagan por el interior de la Tierra y, al encontrarse con discontinuidades profundas, se refractan o reflejan de modo análogo al de los rayos luminosos. Midiendo los tiempos de recorrido, y aplicando los principios de la óptica geométrica, es sencillo deducir las velocidades de propagación y los espesores de las discontinuidades profundas. En la práctica, se representan los sismogramas registrados por las distintas estaciones (alineadas normalmente respecto al punto de tiro) en función de la distancia, se correlacionan o identifican las distintas fases sísmicas y se elaboran y ajustan modelos de estructura que correspondan y expliquen las características observadas.

En los Pirineos, el experimento principal se lleva a cabo en 1978, con organización y financiación hispanofrancesa y cooperación de diversas instituciones europeas. La finalidad de dicho experimento se centra en tres puntos: (*a*), evaluar y comparar los espesores de corteza en la ZAP y en la ZNP; (*b*), investigar el tipo de transición estructural entre ambas zonas y, (*c*), obtener la ley de variación velocidad-profundidad y detectar posibles variaciones laterales en cada zona. Para ello, se efectúan diversas explosiones en el fondo del mar y en sondeos en tierra, las cuales son registradas por una red densa de estaciones portátiles dispuestas a lo largo de cada zona de estudio (perfiles inversos longitudinales), así como transversalmente a dichas zonas (perfiles en abanico). Los resultados más significativos pueden resumirse en dos puntos: diferencias de espesor de corteza y transición entre ambas zonas. Por lo que respecta a las diferencias de espesor, recordemos que la ZAP y la ZNP presentan una gran diferencia en lo referente a la profundidad a la que se sitúa el Moho (discontinuidad existente entre la corteza y el manto superior). Mientras que la ZNP está caracterizada por una corteza continental "normal" (unos 30 kilómetros de espesor), bajo la ZAP se extiende una raíz cortical, con espesores superiores a 40 kilómetros y que llegan hasta 50 en el macizo de La Maladeta. Esta corteza espesa se extiende hacia el oeste hasta los macizos vascos; hacia el este, el Moho se eleva rápidamente desde Andorra hasta la costa mediterránea, donde se sitúa únicamente a unos 22 kilómetros de profundidad.

Los resultados de los perfiles efectuados en abanico [*véase la figura 1*] indican que la transición entre ambas zonas tiene lugar, de manera muy brusca, en la vertical de la FNP, con un desnivel de unos 15 kilómetros de profundidad, del norte al sur, tanto en la parte central como oriental de la cadena. En los Pirineos occidentales, el tipo de transición no puede precisarse debido a la existencia, en esa región, de heterogeneidades importantes en la corteza bajo la ZNP, con velocidades sísmicas muy elevadas, tanto en la corteza superior como inferior. La figura 2 resume los resultados expuestos anteriormente.

Los resultados de perfiles sísmicos indican claramente que la ZAP y la ZNP pertenecían a dos placas distintas: Iberia y Europa. A la vista de ello, resultan difícilmente aceptables modelos evolutivos que consideran la región como una unidad crustal, afectada sobretodo por una extensión intracontinental seguida de movimientos compresivos oblicuos a la disposición actual de la cadena.

Otros modelos consideran efectivamente dos placas distintas, cuya evolución implica una separación entre ambas de unos 100 kilómetros al menos, seguida por un proceso de colisión con subducción de la placa norte (Europa) bajo la placa sur (Iberia), la cual presenta, pues, una duplicación de la corteza. Aunque este modelo es coherente con la mayor profundidad de la corteza en la parte sur, la subducción implicaría un buzamiento progresivo,

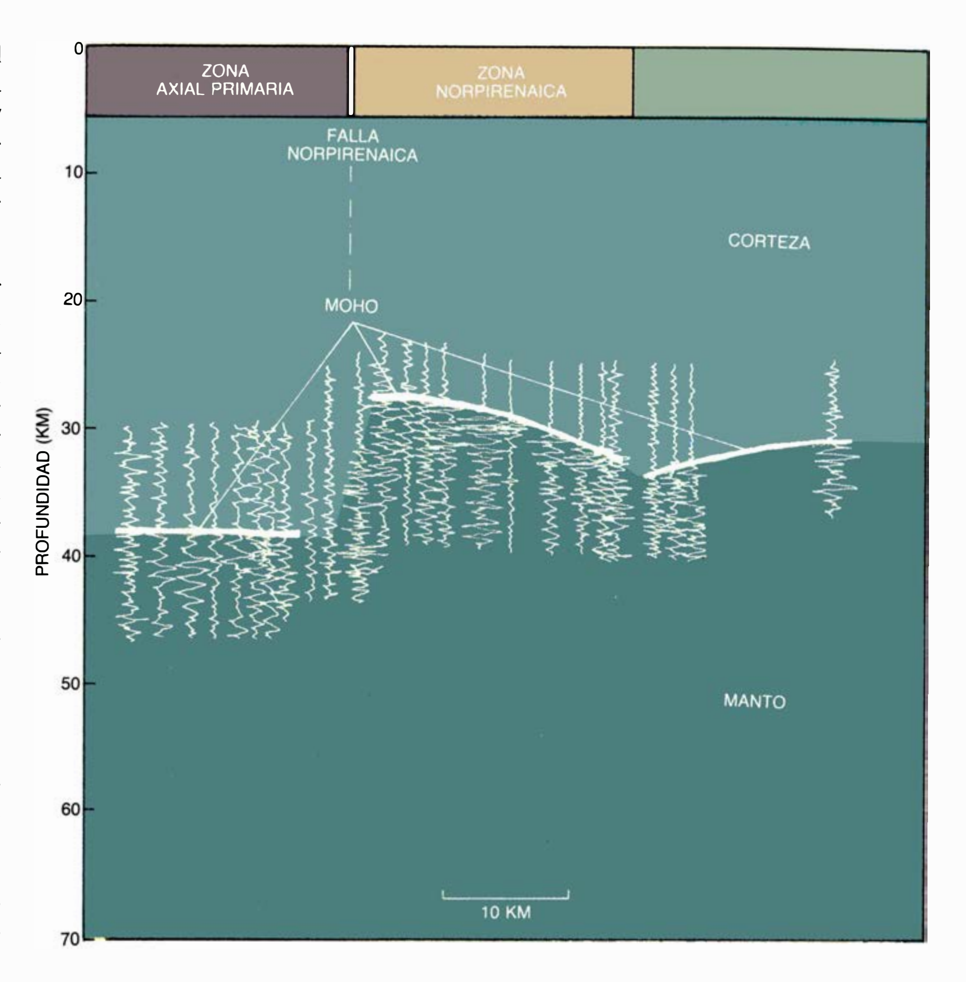
lo cual no concuerda con el desnivel casi vertical observado al aplomo de la falla norpirenaica. Por otra parte, la ley de velocidad-profundidad que se observa en la ZAP es incompatible con la que cabría esperar si existiera esa duplicación de cortezas.

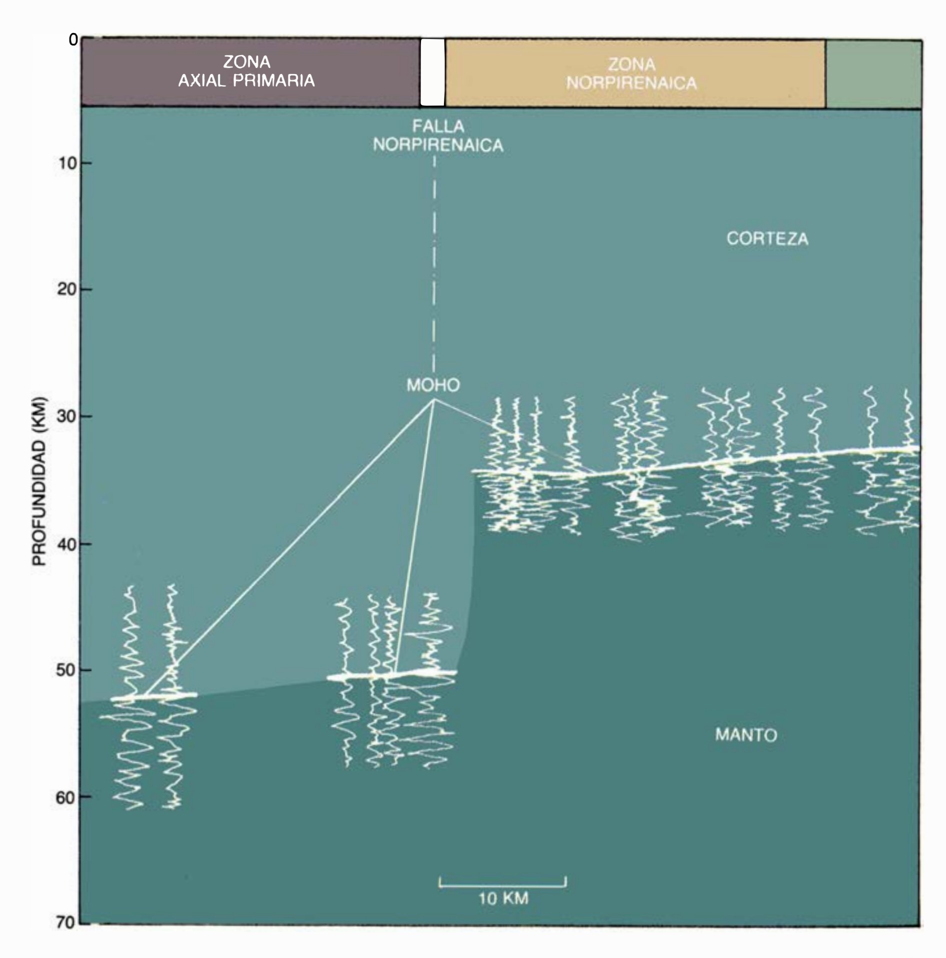
En cambio, los resultados sismológicos sí resultan coherentes con un tercer tipo de modelos evolutivos basados en una rotación antihoraria de la placa Ibérica que comporta movimientos en cizalla a gran escala entre Iberia y Europa a lo largo de un límite abrupto situado a la altura de la FNP, seguidos de una colisión entre ambas que avanza del este hacia el oeste. Antes de profundizar en esta línea, conviene examinar la sismicidad actual de la cadena, así como los recientes trabajos de relación entre estructura profunda y actividad sísmica.

El interés hacia la sismicidad que tiene lugar en la cadena Pirenaica, una de las áreas más activas de la península, se manifiesta, sobre todo, tras la ocurrencia en 1967 de un terremoto destructor, de magnitud 5,5, en Arette (Pirineos occidentales), uno de los más importantes de este siglo. Recordemos que los estudios locales de sismicidad se basan en datos recogidos por diferentes estaciones de registro, permanentes o temporales, instaladas en la región de interés. Los parámetros esenciales a determinar son la distribución espacial y en profundidad de los eventos, así como su mecanismo, que da idea del proceso de ruptura que tiene lugar en el foco sísmico: situación y movimiento del plano de falla y estimación de los ejes principales de tensiones existentes en la zona.

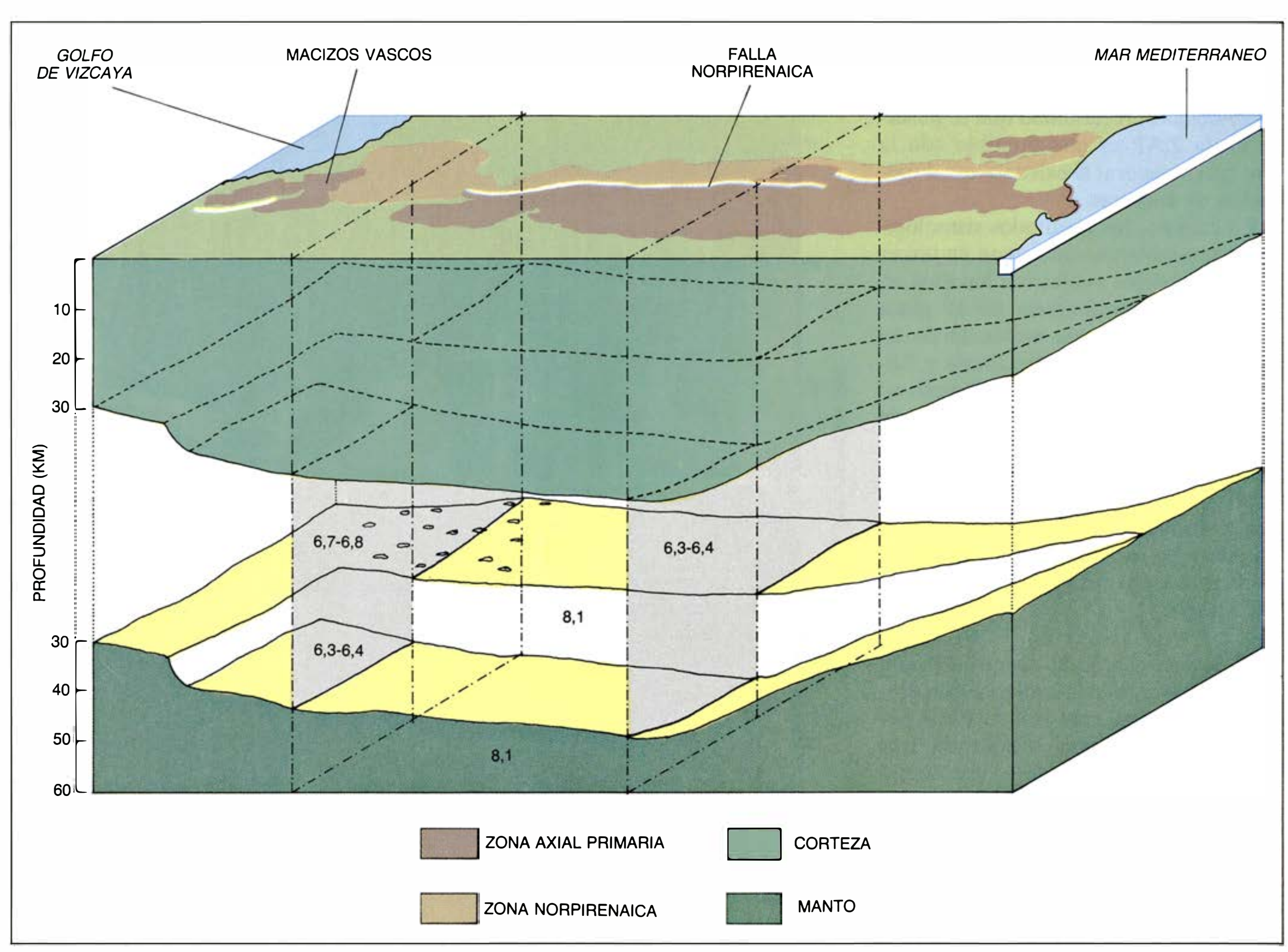
A partir de 1976 empiezan a realizarse en los Pirineos, sobre todo en su parte occidental (la más activa), campañas temporales de sismicidad con material portátil. En 1978 se instala en la región de Arette una red sísmica permanente de ocho estaciones telemetradas sobre una unidad central, cubriendo un área de 50×100 km^2.

En los Pirineos occidentales, desde Lourdes hasta Roncesvalles, la sismicidad está concentrada en una franja este-oeste de anchura no superior a 10





1. Sismogramas correspondientes a dos perfiles en abanico a través de los Pirineos orientales y centrales. Las fases reflejadas en el Moho (discontinuidad entre corteza y manto superior) permiten establecer su profundidad, así como su variación brusca norte-sur.



2. Esquema tridimensional de la estructura profunda de los Pirineos, obtenida a partir de perfiles sísmicos, que ilustra la topografía del Moho. Las cifras indican las velocidades de propagación (en kilómetros por segundo) de las ondas sísmicas longitudinales a ambos lados del Moho.

kilómetros, y activa hasta 20 kilómetros de profundidad. Esta zona sísmica se asocia con la prolongación hacia el oeste de la FNP, sobre la cual parecen situarse, por otra parte, la mayoría de los terremotos detectados en los Pirineos centrales y orientales.

Desde 1980, los terremotos de mayor magnitud ocurridos en los Pirineos (unos 5 en total, de magnitud 4 o mayores) se han estudiado con detalle y se han analizado las réplicas correspondientes y precisado la zona epicentral y la profundidad. Se han calculado, asimismo, los mecanismos focales de estos eventos mayores, así como los de algunos microterremotos (M menor que 3). En definitiva, se tiene actualmente un buen conocimiento de la sismotectónica de los Pirineos occidentales, si bien la diversidad de mecanismos focales que se observa no permite definir una situación regional homogénea de tensiones. Estos terremotos parecen originarse a partir de variaciones muy locales en el estado de tensiones en las distintas fallas, cuya orientación inicial determina el movimiento.

En la parte central y oriental de la cadena pirenaica, los datos sismotectónicos son aún bastante puntuales y no pueden establecerse conclusiones significativas. Muy recientemente se han iniciado investigaciones en zonas como El Canigó o La Cerdaña, que debieran tener una continuación y extensión en los próximos años.

En los trabajos sismológicos recientes, se hace patente un interés por mostrar y precisar la relación entre estructura profunda y sismicidad actual de la cadena Pirenaica. Puede citarse, en particular, una campaña en los Pirineos occidentales con unas 20 estaciones adaptadas a registrar, a la vez, sismos próximos y lejanos (telesismos). Un análisis estructural a partir de los tiempos de llegada de estos telesismos ha permitido establecer en esa zona la naturaleza de la transición entre la ZAP y la ZNP, punto no resuelto con los estudios de perfiles sísmicos. Dicha transición tiene lugar igualmente de manera muy brusca (15 kilómetros de desnivel en unos 5 kilómetros de distancia horizontal norte-sur): coincide en superficie con la franja de sismicidad este-oeste que marca la continuación de la FNP. Puede concluirse, pues, que esta falla constituye la fractura geológica más destacable de los Pirineos, a la cual se asocia la mayor parte de la sismicidad actual; está marcada en la base de la corteza por un salto o desnivel brusco del Moho de unos 15 kilómetros, a lo largo de toda la cadena. Su importancia en la evolución geodinámica de la misma debe ser tenida muy en cuenta en cualquier modelo orogénico de la cordillera Pirenaica. (Josep Gallart.)

Caos, azar y turbulencia

Al echar una ojeada al índice de las revistas de física uno queda sorprendido de la cantidad de artículos que

tratan sobre el caos: caos en sistemas hidrodinámicos, caos en circuitos eléctricos, en láseres, en reacciones químicas y muchos otros caos. ¿Qué nuevo significado ha adquirido esta palabra para despertar tanto interés?

Hasta hace unos años, por caos se entendía de manera imprecisa algo impredictible y desordenado. El movimiento al azar de un grano de polen en el seno de un líquido (movimiento browniano) o el producido por la agitación térmica en los átomos de una red cristalina se dice que son caóticos. Las fluctuaciones observadas son la consecuencia, a nivel macroscópico, de las miriadas de componentes microscópicos del sistema. La manera más razonable de describir esos fenómenos consiste en asociar una distribución de probabilidad a esas fluctuaciones. Esto lo lleva a cabo la mecánica estadística.

La hoja de un árbol arrastrada por la corriente turbulenta de un río de alta montaña sigue una trayectoria impredictible, caótica. La turbulencia es la manifestación de una inestabilidad. En un fluido moviéndose a pequeña velocidad el flujo es laminar; al aumentar ésta el movimiento se hace turbulento. Por debajo de cierto valor del número de Reynolds, parámetro adimensional que expresa la importancia de las fuerzas de inercia frente a las viscosas, los flujos abiertos son laminares; por encima turbulentos. Esta transición aparece también, aunque de manera más gradual, en flujos confinados, ejemplos de los cuales son las estructuras convectivas y los vórtices de Taylor. Las primeras aparecen al calentar suficientemente la parte inferior del recipiente que contiene al fluido (inestabilidad de Rayleigh-Bénard). Los segundos son estructuras disipativas que surgen en un fluido encerrado entre dos cilindros concéntricos que giran (inestabilidad de Taylor-Couette). Cuando la energía que se proporciona desde el exterior, en forma de calentamiento o de giro, es pequeña, los flujos son laminares; a medida que se aumenta se superponen unas oscilaciones hasta que, para valores suficientemente altos, el movimiento adquiere las características de la turbulencia.

Una explicación clásica de la transición a la turbulencia se halla en la *Mecánica de Fluidos* del físico ruso Lev D. Landau. Esta aparecería al hacerse inestables más y más "modos" (variables o grados de libertad). La inestabilidad de un primer modo da lugar a un movimiento periódico. Si se aumenta el aporte externo de energía, otros modos van perdiendo su estabilidad. La superposición de los múltiples movimientos periódicos con frecuencias distintas hace que el movimiento tenga un aspecto caótico.

Esta concepción de la turbulencia se puso en entredicho tras la publicación en 1963 del artículo "Deterministic nonperiodic flow" en el *Journal of Atmosferic Science* (*20*, p. 130). En él, Edward Lorenz estudiaba un modelo simplificado de la inestabilidad de Rayleigh-Bénard, concretado en tres ecuaciones diferenciales no lineales y de primer orden. El análisis numérico de las soluciones reveló que las únicas estables eran la trivial (estado de reposo) y dos estacionarias. No son posibles soluciones periódicas estables. Las trayectorias permanecen en una región alrededor de las soluciones estacionarias, sin llegar a cerrarse nunca y presentan un aspecto errático. Ese comportamiento no es debido a infinitos modos sino sólo a tres y no se puede achacar tampoco a imprecisiones en el cálculo numérico. Trayectorias inicialmente cercanas divergen exponencialmente en el tiempo, por lo que la conclusión más importante del artículo fue que, aun tratándose de un sistema determinista, su evolución es intrínsecamente impredictible. Sólo si se conocieran con absoluta precisión las condiciones iniciales (lo cual es imposible, según el principio de indeterminación de la mecánica cuántica) se podría determinar la posición del sistema en un futuro lejano. El modelo de Lorenz, aunque no da cuenta detallada de los movimientos convectivos, ha servido para mostrar que es posible encontrar trayectorias muy irregulares en sistemas deterministas regidos únicamente por tres modos.

David Ruelle y Floris Takens se dieron cuenta del hallazgo y publicaron en 1971 un artículo, hoy clásico (*Comm. Math. Phys. 20*, 167), en el que formulaban la teoría general de lo que llamaron atractores extraños, un caso particular de los cuales es el atractor de Lorenz. En sistemas que disipan la energía las trayectorias son "atraídas" hacia una región del espacio de fase, pero son extremadamente sensibles a las condiciones iniciales. Actualmente se emplean también para designarlos los términos *atractores caóticos* o *atractores fractales* (relacionados con la dimensión fractal de Mandelbrot).

Un comportamiento errático de unas trayectorias deterministas muy sensibles a las condiciones iniciales recibe el nombre de *caos*. El caos es de naturaleza distinta de la turbulencia: ésta es impredictible a corto plazo, mientras el caos lo es a largo plazo. También es diferente del comportamiento estocástico de las fluctuaciones, ya que el caos hace referencia a sistemas deterministas.

Se han encontrado nuevas *rutas* o *escenarios* para el caos, entre las que cabe destacar las de May, Feigenbaum y Pomeau y Manneville, y bastantes modelos en los que aparece. Mediante nuevas técnicas matemáticas, basadas en las secciones de Poincaré, los exponentes de Liapunov o la dimensión fractal, por citar tres ejemplos, se pueden caracterizar los atractores caóticos, distinguiéndolos del ruido estocástico presente en cualquier sistema real o en el propio cálculo numérico. Se intenta en la actualidad una clasificación de atractores similares en clases de universalidad, análogas a las de los fenómenos críticos.

Se ha hablado de modelos, ecuaciones, escenarios, pero ¿se encuentra este tipo de caos en la naturaleza? Experimentos muy recientes confirman su presencia en sistemas hidrodinámicos (inestabilidad de Rayleigh-Bénard, vórtices de Taylor), electrónicos (diodos, transistores, uniones de Josephson), en diversos tipos de láser, en reacciones químicas (especialmente en la de Belousov-Zabotinski), en algunos modelos utilizados en ecología y climatología. El caos es un tipo de comportamiento común en la naturaleza.

Pero el caos se encuentra también en el arte. Las esculturas dinámicas, del tipo Calder por ejemplo, están compuestas de brazos articulados movidos por el viento (osciladores forzados). Casi siempre el movimiento de los brazos es periódico, pero se ha demostrado que puede ser errático, caótico, siempre que la escultura tenga dos o más articulaciones. Será interesante ver si este comportamiento se obtiene también en modelos económicos o de opinión pública y cómo se interpreta.

¿Y en la filosofía? El concepto de caos, que aquí no es sinónimo de anarquía, tiene un aspecto positivo: siendo mecanicista, refleja un futuro incierto y, por tanto, una cierta libertad. Deja de tener sentido la postura de aquellos que invocaban los principios de la mecánica para defender un determinismo a ultranza. Es posible que dentro de poco la investigación sobre el caos permita también explicar la contradicción que existe entre las descripciones mecanicista (reversible) y termodinámica (irreversible) del mundo material. (Carlos Pérez.)

Reproducción digital del sonido

La grabación del sonido en forma de una serie de números discretos proporciona reproducciones de calidad excepcional. Este método permite mejorar las grabaciones realizadas con otras técnicas

John Monforte

Podemos hoy escuchar a Enrico Caruso en una grabación de calidad muy superior a cualquiera de las realizadas a lo largo de su vida. La explicación de este hecho radica en la digitalización de las viejas grabaciones de cilindros de cera: los tonos musicales se reproducen en forma de series de números discretos en lugar de la onda analógica de variación continua que constituía la base de las grabaciones antiguas. La señal digitalizada se procesa en un ordenador con el fin de eliminar las distorsiones que originó la bocina de registro. Todo ello trae consigo un reforzamiento del sonido de la voz de Caruso. Aunque esta técnica se encuentra todavía en fase experimental y debe perfeccionarse, un oyente contemporáneo puede apreciar con claridad la calidad de la voz de este gran tenor.

Tal vez algún día los procesos de digitalización mejoren sustancialmente las grabaciones de otros grandes artistas del pasado; sin embargo, su función principal en la actualidad consiste en la obtención de grabaciones de alta calidad de interpretaciones musicales contemporáneas.

El proceso digital es una forma completamente nueva de almacenar, procesar y generar audioseñales. El fonógrafo es el primer componente de los audiosistemas que se beneficia de este procedimiento pero, con el tiempo, todos los componentes de la cadena, desde la grabación hasta la reproducción, serán reemplazados por una instalación equivalente capaz de tratar el sonido como datos digitales. Las técnicas de procesamiento digital sirven también para componer e interpretar música usando sonidos que no tienen equivalente en los instrumentos convencionales.

Una grabación digital típica puede llegar al consumidor en forma de un disco aluminizado de 120 milímetros de anchura. El sonido digitalizado se registra bajo la forma de una serie de pozos microscópicos y superficies planas. En lugar de la aguja de los tocadiscos antiguos, el mecanismo de reproducción está constituido por un haz de láser. Un conjunto de amplificadores y altavoces llevan el sonido hasta el oyente.

La mejora en la calidad del sonido que se obtiene en tales grabaciones se debe, en parte, al hecho de que la digitalización supera muchas de las limitaciones propias de las grabaciones analógicas. En toda grabación analógica, la señal (música o cualquier otro sonido) se pone de manifiesto en forma de variación continua de una amplitud a lo largo del tiempo. Si la representáramos gráficamente, veríamos que dicha señal está constituida por una serie de ondas irregulares. Cuando un dispositivo de grabación determinado recibe esta onda, actúa sobre ella según una forma que viene condicionada por la función de transferencia del dispositivo en cuestión (la función de transferencia es una descripción matemática de la forma en que el dispositivo reproduce el sonido, incluyendo los ruidos y las distorsiones características que el dispositivo imparte a la señal que lo atraviesa). Por último, el dispositivo proporciona una onda electroacústica de salida que es una réplica de la onda de entrada.

La función de transferencia se aplica a dispositivos tales como un amplificador, cuya función consiste en aumentar la amplitud de la señal, o un transductor, que transforma una señal de una forma de energía en otra (como sucede con un altavoz, que transforma la energía eléctrica en energía acústica). La función de transferencia debe diseñarse de suerte tal que sea lo más lineal posible, con el fin de poder seguir la onda representativa del sonido original con la mayor exactitud. Cualquier desviación de la linealidad introduce una distorsión sobre la forma de onda. Todo sistema analógico muestra cierto grado de no linealidad.

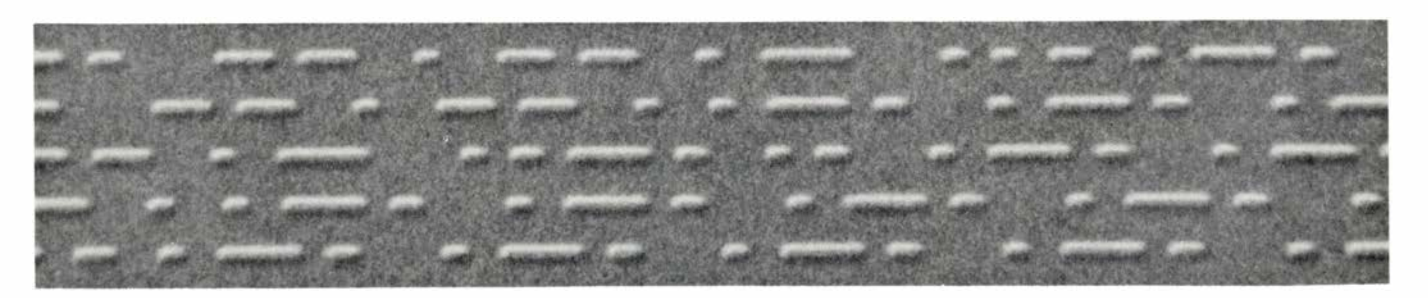
El problema del ruido está siempre presente en un sistema analógico. Cuando una señal se transforma en un transductor, un micrófono por ejemplo, el nivel de salida está muy próximo al nivel de ruido térmico producido por las vibraciones aleatorias de los electrones en el transductor. Este resultado lamentable tiene su origen en el hecho de que el rendimiento de un transductor es del orden del 1 por ciento. Cuando la señal se almacena en un medio de grabación, el propio medio se convierte en una fuente de ruido. La causa es la naturaleza granular de dicho medio. La granularidad proviene de factores tales como el tamaño de los dominios magnéticos en una cinta de grabación o las irregularidades que presenta la superficie de un disco. El ruido al que nos estamos refiriendo marca un límite inferior para el poder de resolución del medio de registro.

El problema del ruido

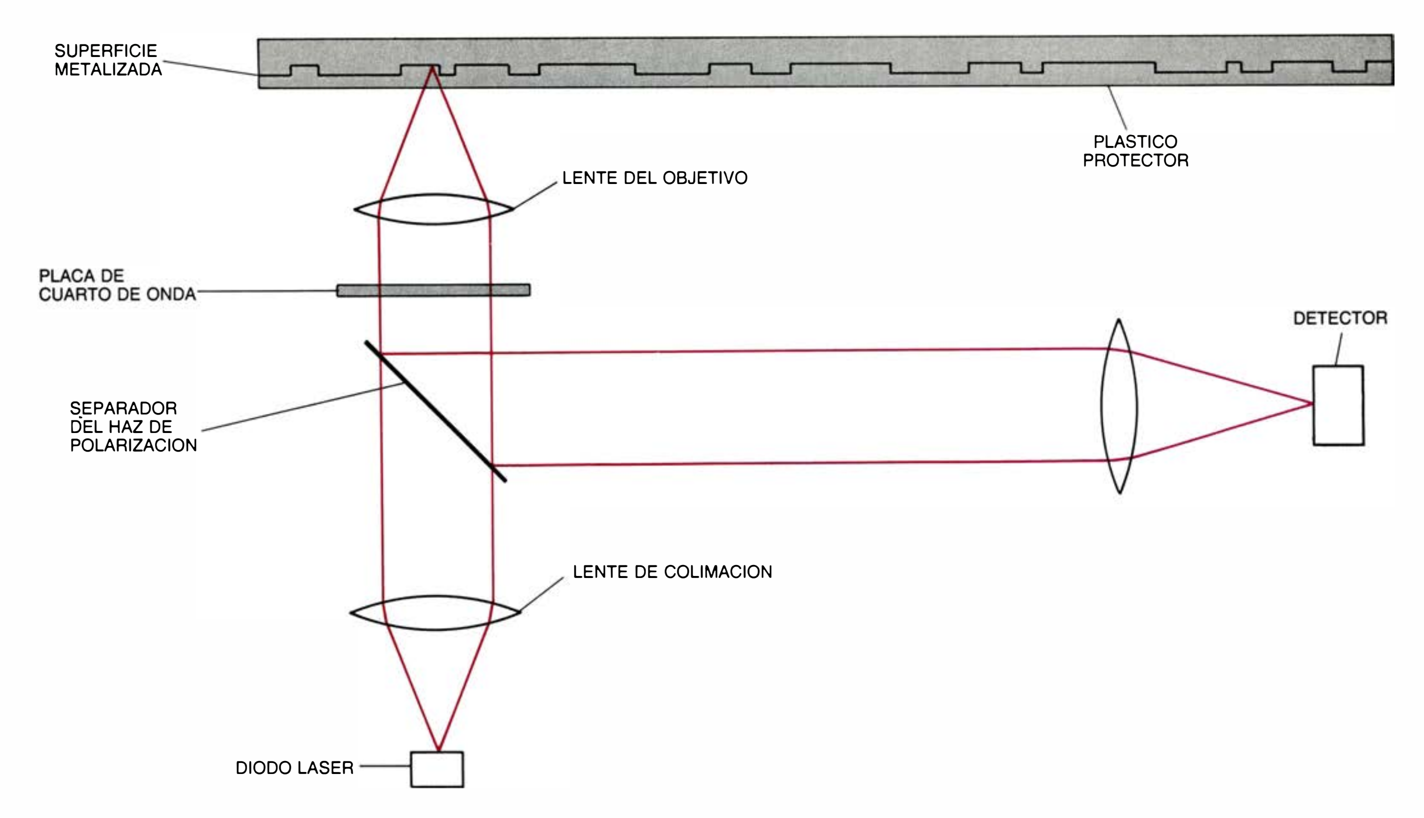
Todos los componentes de un audiosistema poseen también un límite superior. El tamaño de la señal tan sólo puede aumentar en tanto en cuanto el sistema no esté sobrecargado. Esta limitación es universal, tanto si se trata de un amplificador que no puede emitir más potencia, de un altavoz cuyo elemento productor de sonido puede moverse sólo hasta cierto punto o del surco de un disco que no puede llegar a confundirse con otro surco adyacente. Característica (aunque no la única) de la alta fidelidad es la diferencia existente entre la señal más alta posible y el nivel de ruido. Esta diferencia, conocida por intervalo dinámico, se mide en decibelios.

Otra de las limitaciones fundamentales presentes en todos los dispositivos de grabación está relacionada con la anchura de banda. La anchura de banda proporciona una medida de velocidad de respuesta del sistema frente a los cambios bruscos de amplitud que son característicos de los sonidos. Tanto si la causa es la inercia mecánica,

1. REPRODUCCION DIGITAL para el consumidor. Se basa en un Disco Compacto de 120 milímetros de diámetro por 1,2 milímetros de grosor. Los datos digitales se almacenan en forma de una serie de protuberancias y zonas planas de tamaño microscópico, que representan, respectivamente, los dígitos binarios 1 y 0. El 1 corresponde al principio o al fin de una protuberancia; el 0 corresponde a una región sin cambios. El haz del láser desempeña un papel equivalente al de la aguja de un tocadiscos convencional. El Disco Compacto fue desarrollado por la empresa Philips (Holanda) en colaboración con la compañía Sony (Japón). La capacidad de uno de estos discos (500 megabytes) constituye la forma de almacenamiento de datos más densa que se conoce.



2. PROTUBERANCIAS DE ESTE TIPO, que representan los datos almacenados, jalonan la superficie de los Discos Compactos. Las protuberancias tienen una altura de 0,16 micrometros por una anchura de 0,6 micrometros. La señal registrada en la zona del disco que aquí se representa corresponde al silencio; en consecuencia, la imagen es bastante repetitiva y sólo está interrumpida por las palabras digitales que se utilizan para corregir los errores y estructurar los grupos de datos. Esta microfotografía ha sido tomada desde el lugar del disco que es leído por el haz de láser. (Fotografía del autor.)



3. EL MECANISMO DE LECTURA DEL LASER convierte la imagen resultante de la reproducción de un disco en cambios de la intensidad de un haz luminoso monocromático y colimado. El haz, procedente de un diodo láser, atraviesa una lente de colimación que corrige la tendencia a divergir del haz. Un divisor polarizado separa el haz concentrado y envía una parte del mismo a un detector (*derecha*); el resto del haz atraviesa otro filtro girado un ángulo de 90 grados alrededor del eje de polarización. Una lente de objetivo focaliza el haz sobre la superficie del disco. Las dimensiones de las protuberancias existentes en el disco, complementarias de los pozos practicados en el proceso de fabricación del disco original ("master"), son comparables a la longitud de onda del haz incidente. (El tamaño de tales protuberancias se ha exagerado.) Las protuberancias difunden la luz e impiden su retorno al detector, quien registra esta disminución en la intensidad del haz. Las variaciones de la intensidad se representan por un sistema de dígitos binarios, en forma de 1 y 0.

los factores eléctricos o cualquier otra fuente, esta cualidad determina el valor máximo de la frecuencia susceptible de ser registrada.

Todo sonido constituye un desafío para la anchura de banda (o intervalo de frecuencia) de un audiosistema. En general, todo sonido está constituido por una frecuencia fundamental (tono), que permite al oyente percibir la nota, y una serie de frecuencias más altas (los armónicos o sobretonos). La presencia de armónicos determina el timbre del sonido. Todos estos elementos existen simultáneamente. En los tonos musicales menos disonantes, los armónicos están ordenados en una serie de frecuencias que, en su mayor parte, son múltiplos pares de la fundamental. Un audiosistema será útil cuando responda a toda la banda de frecuencias que el oído humano puede percibir, lo cual supone una anchura de banda del orden de 20.000 hertz.

El proceso de digitalización se abordó, en los Bell Telephone Laboratories en los años veinte, con el fin de superar las limitaciones de las grabaciones analógicas. Sin embargo, esta técnica sólo se desarrolla plenamente en fechas mucho más recientes, gracias a la introducción de avances tecnológicos tales como el procesamiento por ordenador y las micropastillas versátiles ("microchips"). Los sistemas digitales son muy superiores a los sistemas analógicos y su coste es competitivo. Sin duda alguna, esta tendencia todavía no ha alcanzado su techo.

En un audiosistema digital, la onda original se reduce a una serie de números que describen su forma. Estos números se introducen a continuación en un ordenador. Este puede proceder simplemente a su almacenamiento en memoria para su recuperación posterior, o puede procesarlos con la ayuda de ciertos algoritmos matemáticos con el fin de convertir a las ondas que representan en efectos musicales o acústicos. Las señales digitales que representan dichos números pueden acumular ruido y distorsiones en el proceso de almacenamiento o manipulación. Sin embargo, siempre que no se pierdan y se mantengan razonablemente reconocibles, tales números permitirán reconstruir la onda original con una pequeña pérdida de calidad.

El primer paso en una grabación digital consiste en la digitalización de la audioseñal. El dispositivo que realiza este cometido se denomina convertidor analógico-digital. Debido a que la forma de onda de una señal analógica es una función bidimensional de la amplitud en términos del tiempo, es necesario desarrollar una señal digital que describa con precisión ambas magnitudes.

En primer lugar, la señal se muestra a intervalos regulares de acuerdo con una frecuencia de muestreo normalizada. En consecuencia, los datos se recogen a una velocidad predeterminada. Cuando llegue el momento de reconstruir la señal analógica, la información correspondiente debe suministrarse exactamente con la misma velocidad, a fin de evitar cambios en la evolución temporal o en la frecuencia.

El voltaje que representa la amplitud de la señal en el momento de la conversión se almacena en forma analógica durante un tiempo lo suficientemente grande como para poder medirlo y asignarle un número adecuado. Esta etapa se conoce con el nombre de cuantización. Puesto que cada muestra origina un nuevo número, este proceso proporciona una corriente continua de datos susceptibles de ser manejados por cualquier sistema digital.

Para reconstruir la señal, estos datos se introducen en un convertidor digital-analógico con la misma velocidad utilizada en el muestreo al que nos hemos referido. El convertidor desarrolla una diferencia de potencial que representa

el valor de cada uno de los datos y lo mantiene hasta que recibe un nuevo dato. La señal resultante es una réplica de la onda original.

Fuentes de error

La señal puede resultar distorsionada en un muestreo inadecuado por dos motivos diferentes. Uno de ellos está relacionado con la frecuencia del muestreo y el otro con la cuantización. Ambos problemas se resuelven con un muestreo más minucioso, pero esta posibilidad exige una capacidad de procesamiento de datos mucho mayor. Incluso así resulta imposible eliminar estas distorsiones por completo, dado que la onda analógica es una función continua de la amplitud y del tiempo, mientras que cualquier representación digital debe ser discreta. Ahora bien, una vez que la señal ha sido digitalizada, se puede transmitir o copiar indefinidamente sin acumular ninguna nueva distorsión o ruido que no estuviera ya presente en el momento de la digitalización.

En primer lugar, una señal puede resultar distorsionada como consecuencia de un muestreo de baja frecuencia. Si la frecuencia del muestreo no es lo suficientemente elevada, la amplitud de la señal puede variar en una fracción mayor que la de un "cuanto" durante el intervalo de muestreo. (El "cuanto" representa la magnitud del paso más pequeño necesario para describir adecuadamente la señal.) En otras palabras, la señal varía demasiado rápidamente para que el sistema pueda grabarla bien. Cuando la señal se reconstruye, este cambio no se pone de manifiesto; la información se ha perdido.

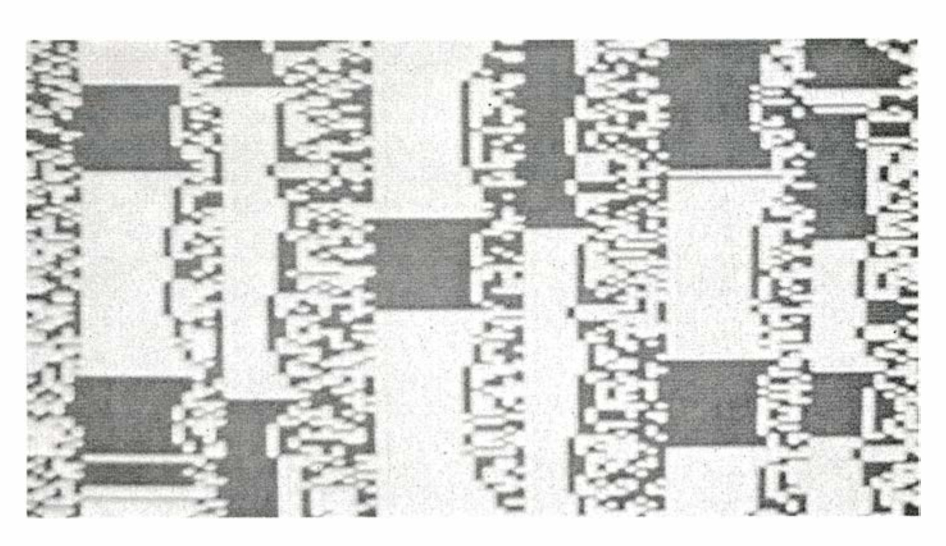
Estos cambios rápidos de la amplitud están producidos por los componentes del sonido cuya frecuencia es más alta que la mitad de la frecuencia de muestreo. La presencia de estos componentes hace que la señal reconstruida parezca contener una componente cuya frecuencia es igual a la frecuencia del muestreo menos la frecuencia original. Este fenómeno se conoce con el nombre de duplicación (*foldover*). Los componentes mal muestreados de la señal aparecen en la reproducción como componentes nuevos del todo, sin relación armónica.

El sonido a que da lugar el fenómeno de la duplicación no es musical. En realidad, dicho sonido resulta bastante raro. Para evitar este resultado, la frecuencia del muestreo debe ser suficientemente alta como para incluir todos los armónicos más importantes de la señal. Por otra parte, es esencial colocar un filtro delante del dispositivo que lleva a cabo el muestreo, para así limitar la amplitud de banda y eliminar todos los componentes indeseables. El filtrado debe realizarse en el dominio analógico, antes de que tenga lugar el proceso de digitalización.

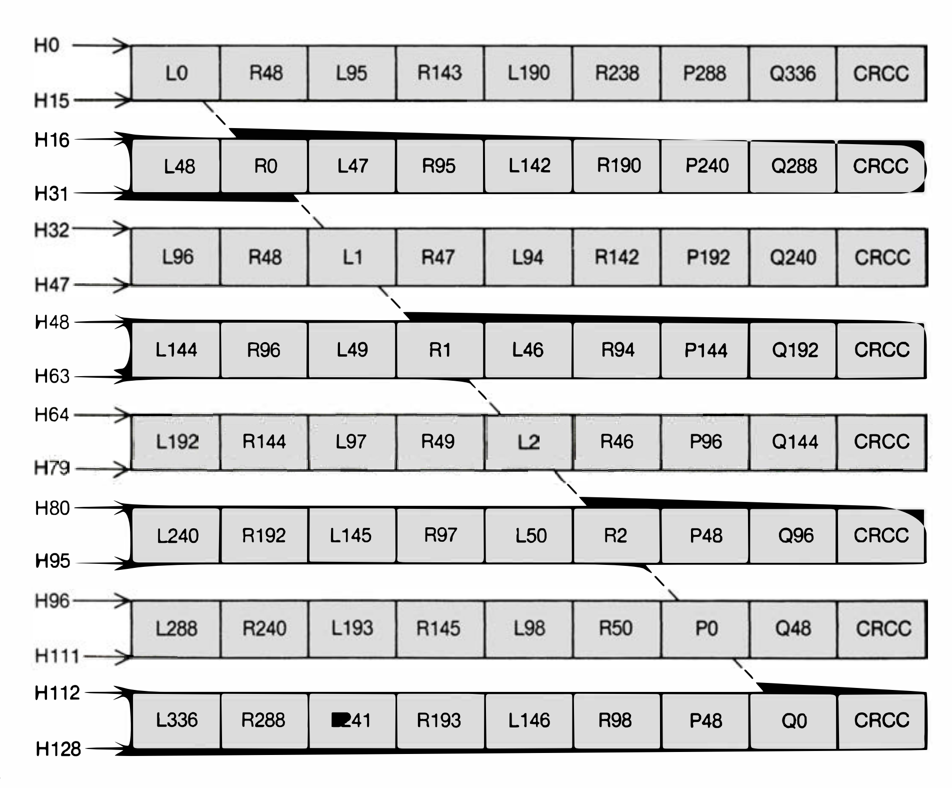
La señal se filtrará de nuevo después de haberse reconstruido, dado que la señal obtenida al final del proceso de réplica tiene forma de escalera como consecuencia de la naturaleza discreta del proceso de muestreo. Los bordes de los escalones representan ciertos componentes de alta frecuencia que no estaban presentes en la señal original.

Error de cuantización

La segunda forma de distorsión se llama error de cuantización. Esta distorsión se produce cuando la palabra digital no es lo suficientemente grande como para describir la amplitud. Cuando el nivel de amplitud real está comprendido entre dos cuantos conse-



4. ALMACENAMIENTO DIGITAL por cinta de vídeo, como alternativa al disco; produce una imagen igual a la de una pantalla de televisión. Los puntos blancos y negros representan los dígitos binarios.



5. ESTRUCTURA DE LA RED de datos digitales registrados en una cinta de vídeo; está constituida por 245 líneas horizontales similares a las 128 que se han representado en esta figura. Cada grupo de 16 líneas contiene tres palabras de datos en el canal izquierdo de la cinta (*L*), tres en el canal derecho (*R*), dos palabras asociadas con una forma de corrección de errores conocida como control de la paridad (*P,Q*) y una palabra del código utilizado para la técnica de corrección de errores denominada código de comprobación de redundancia cíclica (*CRCC*). Habida cuenta que la cinta de vídeo tiende a perder líneas horizontales completas, los datos quedan intercalados (*en línea diagonal*). Las palabras de corrección de errores distribuidas a lo largo de la cinta permiten reconstruir los datos que se puedan haber perdido.

cutivos, el digitalizador está obligado a elegir entre ambos, y esta elección introduce inevitablemente un cierto error.

Globalmente, dichos errores se distribuyen al azar. El sonido resultante es similar al ruido; la única diferencia estriba en que sólo se produce en presencia de una señal. Lo que se oye es un zumbido que parece estar relacionado con la señal. La solución de este problema consiste en mezclar un ruido analógico de cierta amplitud con la señal de salida con el fin de enmascarar el ruido de cuantización. Como resultado de este proceso, el ruido suena al azar y la distorsión consiguiente se reduce notablemente.

Una vez que la amplitud de la señal en un instante dado se ha representado mediante un número, debe almacenarse el valor correspondiente. Puesto que los datos van a procesarse en un ordenador digital, la palabra debe ser binaria. El formato más corriente se conoce con el nombre de modulación lineal de código de impulso, basado en una idea desarrollada en los laboratorios Bell por A. H. Reeves en 1939.

El número se representa habitualmente en forma de una palabra de 16 bits. Todos los pasos, o cuantos, tienen idéntica magnitud. El valor, que equivale a la mitad del valor máximo (1000000000000000), representa el silencio, es decir, un "estado sin señal". Este número va aumentando hasta un número con todo unos a medida que la onda avanza en una dirección (positiva) a partir del reposo, y va disminuyendo hacia un número con todo ceros a medida que la onda avanza en la otra dirección (negativa). El sistema lineal de 16 bits está incorporado en la mayoría de los discos digitales existentes en el comercio. Este sistema llega a alcanzar un intervalo dinámico de 96 decibelios, lo cual supone unos 20 decibelios más que la capacidad de las grabaciones analógicas y unos 30 decibelios más que los discos de fonógrafo.

Aunque la modulación lineal de código de impulso es el método más corriente de conversión, no es, ni mucho menos, el mejor para todas las aplicaciones. Disponemos ya de otros métodos de conversión. Uno de éstos reduce notablemente la cantidad de información necesaria para representar la señal; se basa en almacenar sólo la diferencia entre una muestra dada y la anterior. Esta técnica se conoce con el nombre de modulación delta (diferencia).

La modulación delta supone que la señal que se está muestreando es prácticamente continua y que los cambios grandes sólo se producen en períodos de tiempo dilatados. Esta suposición es particularmente válida en el caso de la música, puesto que las amplitudes de los armónicos de los instrumentos musicales tienden a ser menores que la amplitud de la frecuencia fundamental.

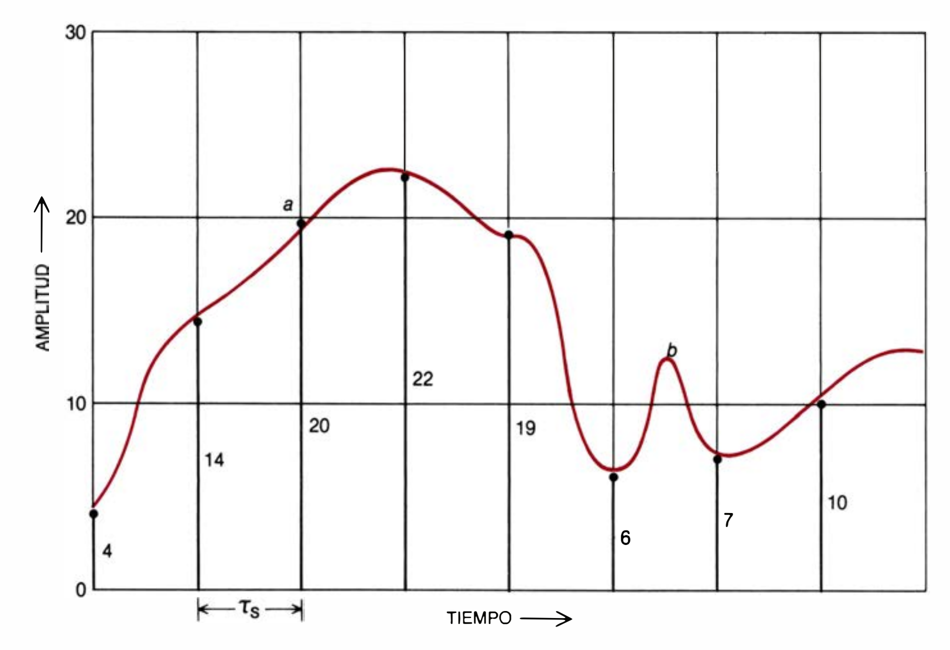
Se puede suscitar un debate acerca de cuál es el método de codificación que proporciona los sonidos más reales. El método lineal es el más simple. Se conseguirá un alto grado de fidelidad siempre que la señal se muestree con la suficiente frecuencia y se represente por un buen número de bits.

Por otra parte, el método lineal no es necesariamente la forma más eficiente de utilizar el espacio de almacenamiento. El cerebro tiende a ignorar las señales sensoriales que persisten durante un largo tiempo y se preocupa, en cambio, por las variaciones (de la misma forma en que somos conscientes de cuando nos ponemos o quitamos los zapatos pero tendemos a ignorarlos durante el resto del día). De ahí que se pueda argumentar que la modulación delta hace un uso mucho más eficiente del almacenamiento. El espacio ahorrado almacenando palabras más pequeñas puede llenarse con muestras más frecuentes lo que, a su vez, facilita la operación de filtrado y reduce la posibilidad de una sobrecarga debida a señales de variación rápida.

Almacenamiento de datos

Existen varias formas de almacenar los datos obtenidos en un muestreo. La forma más directa y simple consiste en introducir la información en el mismo sistema de almacenamiento que utiliza un ordenador digital. Sin embargo, el gran volumen de datos a manejar hace impracticable esta clase de almacenamiento. Una señal digital muestreada con una frecuencia de 40 kilohertz ocuparía más de 200 megabytes de memoria en un minuto. Por otra parte, la capacidad de acceso al azar de la memoria del ordenador no es necesaria para la música, dada su naturaleza intrínsecamente secuencial.

El método corriente de almacenamiento secuencial utilizado en los ordenadores digitales es la cinta magnética. Muchos audiograbadores utilizan esta misma técnica (y en algunos casos los mismos componentes). Los audiograbadores se diferencian de los sistemas utilizados en los ordenadores digitales por el hecho de que los grabadores se alimentan de más de un flujo de datos a la vez (procedentes de varios convertidores), los cuales deben almacenarse en pistas adyacentes. De esta forma, el ingeniero puede grabar partes musicales diferentes en tiempos distintos y combinarlas a voluntad más tarde.



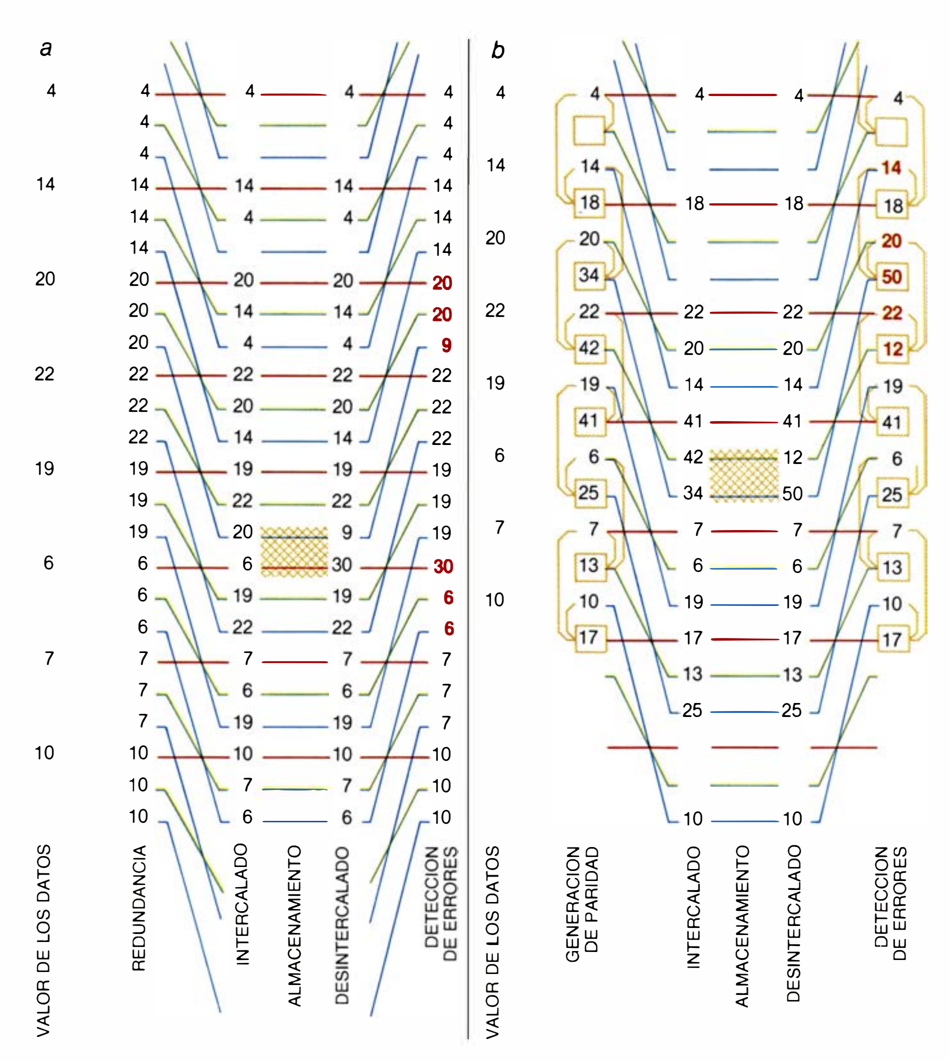
6. SE INICIA EL PROCESO DE DIGITALIZACION cuando un convertidor analógico-digital recibe una onda analógica (*color*). La onda consiste en un voltaje que varía de forma continua en el transcurso del tiempo. El convertidor muestrea esta onda unas 48.000 veces por segundo, es decir, una vez cada τ_s segundos. Cada muestra está representada por un punto. La amplitud de los sonidos muestreados se representa en escala decimal. Los errores se originan por las variaciones demasiado grandes de la amplitud (*a*). En este caso, el valor correcto es menor que 20 y mayor que 19. El sistema es incapaz de discernir estas pequeñas diferencias y asigna arbitrariamente al punto el valor más próximo; la reproducción contendrá este "error de cuantización". Otro tipo de error (*b*) se produce cuando la frecuencia del muestreo es demasiado baja para percibir los cambios de la señal. Todos estos errores se pueden reducir utilizando pasos de cuantización pequeños y frecuencias de muestreo grandes, procedimiento que origina un número mayor de palabras, también mayores. El tratamiento de los datos se hace más difícil.

Otra técnica común consiste en almacenar los datos digitales en una cinta de vídeo. La anchura de banda de un grabador de vídeo es grande a fin de poder acomodar la enorme cantidad de información necesaria para describir toda la gama de luminosidades que puede existir en una imagen de vídeo. En la audiograbación, cada bit está representado por un elemento de imagen individual ("pixel"); este elemento será blanco o negro dependiendo de que el bit sea 0 o 1. La señal digital se convierte en una señal de vídeo convencional, lo cual permite la utilización de cualquier grabador normal de vídeo.

Cuando llega el problema de proceder a una distribución comercial masiva de las grabaciones digitales resulta que la cinta magnética no es el soporte ideal. El motivo radica en el hecho de que cada copia debe ser obtenida a partir de una grabación original (*master*), lo cual supone la transferencia del sonido grabado a lo largo de una secuencia temporal. La eficacia en la producción exige la utilización de un método similar al utilizado en los discos de fonógrafo, en el que la totalidad de la grabación se estampa de una vez mediante un proceso metalúrgico.

El sistema utilizado en la actualidad se denomina Disco Compacto (CD de "compact disc"). Este sistema fue desarrollado por la empresa Philips (Holanda), en colaboración con la empresa Sony (Japón). Estos discos tienen 120 milímetros de diámetro por 1,2 milímetros de espesor. Cada cara almacena hasta 74 minutos de grabación. Los datos digitales se almacenan originalmente en forma de una serie de hoyos o de ausencia de tales, representando respectivamente al 1 y al 0. El 1 corresponde al lugar donde empieza o termina un hoyo y el 0 se sitúa donde no existe ningún cambio. La superficie grabada se vacía en plástico a partir de un molde obtenido con la grabación original (*master*). Los hoyos se convierten ahora en protuberancias. A continuación, esta superficie se aluminiza para hacerla reflectora (el dispositivo de reproducción utiliza un haz de láser); finalmente, se recubre con una capa delgada de plástico transparente.

Cuando escuchamos el disco, el haz del láser incide sobre una zona plana o sobre una protuberancia. Si incide sobre una zona plana, el haz se refleja hacia un dispositivo de registro óptico. En cambio, cuando incide sobre una protuberancia, el haz es difundido. El sensor registra las variaciones de la intensidad como 1 y la ausencia de cambios como 0. Evidentemente, la superficie del disco debe mantenerse cons-



7. CONTROL DE LOS ERRORES y formas de llevarlo a cabo. En esta figura se ilustra la aplicación de dos de estos métodos a los datos obtenidos en el muestreo representado en la figura 6. Uno de estos métodos se basa en la redundancia (*a*). Las palabras de datos situadas en la columna de la izquierda deben convertirse en redundantes mediante un proceso de repetición (*segunda columna*). Puesto que el medio de almacenamiento tiende a perder datos en forma de explosiones, las palabras redundantes no deben almacenarse junto a los datos originales. En consecuencia, los datos son intercalados de acuerdo con una configuración predeterminada, representada en esta figura mediante líneas coloreadas. El proceso de intercalación se lleva a cabo antes del almacenamiento (*tercera columna*). La introducción de ciertos errores (*zona sombreada*), tales como un 20 que se lee como 9 y un 6 como 30, se pone de manifiesto al deshacer la intercalación (*cuarta columna*), según muestran los números en color (*quinta columna*). En el segundo método (*b*), los mismos datos se someten a un proceso de redundancia cíclica. En este caso, las palabras encerradas en rectángulos son generadas sumando cada par de palabras de datos. Los errores se ponen de manifiesto en la recuperación, cuando las sumas no encajan. En los ejemplos aquí representados 14 + 20 aparece como 50 y 20 + 22 como 12. Dado que cada palabra de datos contribuye a la formación de dos palabras de comprobación de redundancia cíclica, este método permite determinar qué valores son incorrectos y, a continuación, deducir cuáles son los adecuados, eliminando los errores detectados.

ANTES DEL ALMACENAMIENTO:

PALABRA DE DATO #1	19 →	010011
+ PALABRA DE DATO #2	6 →	+ 000110
PALABRA DE PARIDAD		010101 = "21"

DESPUES DE LA RECUPERACION:

PALABRA #1 PERDIDA:		PALABRA #2 PERDIDA:		PALABRA DE PARIDAD PERDIDA:	
PALABRA DE PARIDAD	21 → 010101	PALABRA DE PARIDAD	010101	PALABRA DE DATO #1	010011
− PALABRA DE DATO #2	6 → 000110	− PALABRA DE DATO #1	010011	+ PALABRA DE DATO #2	000110
PALABRA DE DATO #1	010011	PALABRA DE DATO #2	000110	PALABRA DE PARIDAD	010101

8. COMPROBACION DE LA PARIDAD para protegerse contra los errores. En este ejemplo, cuando las palabras de datos binarios con valores de 19 y 6 se suman sin el paso de transporte normal, dan lugar a una palabra de comprobación de la paridad de 21. Si, tras la recuperación de los datos registrados, cualquiera de las tres palabras contiene un error o se ha perdido, puede reconstruirse fácilmente (*parte inferior*), siempre y cuando el resto de las palabras se mantenga intacto. (Ilustración de Hank Iken.)

tantemente en un mismo plano y el sistema óptico debe permanecer fijo, de manera que la distancia entre la lente del objetivo del láser y el disco no varíe. En caso contrario, el haz dejaría de estar focalizado y la superficie sobre la que incidiría sería mayor que la de una protuberancia. Los servosistemas de que están dotados los dispositivos ópticos llevan a cabo los pequeños ajustes necesarios para mantener constante dicha distancia.

Corrección de errores

La densidad de almacenamiento de los audiosistemas tiende a ser mucho mayor que la de los ordenadores convencionales. En consecuencia, es preciso contar con medios de detección y corrección de errores altamente refinados. Dado que cada sistema de almacenamiento posee unos defectos específicos, la forma de corrección de errores dependerá del método de almacenamiento utilizado. Los datos almacenados por modulación de código de impulso muestran una particular sensibilidad a las pérdidas aleatorias de bits. Esta vulnerabilidad tiene su origen en el hecho de que los bits individuales representan diferentes órdenes de magnitud y, por tanto, unidades de información diferentes. Cuanto mayor sea el orden representado por un bit dañado, tanto más afectada resultará la salida. El sonido que se oye en este caso se parece, en realidad, a una explosión.

Todas las correcciones de errores se desarrollan a través de la formación de nuevas palabras a incluir entre las palabras de los datos originales. En consecuencia, las nuevas palabras pueden estar afectadas por las mismas fuentes de error que las originales. La propagación de errores no puede eliminarse por completo. Lo deseable es un método de corrección de errores para el cual la probabilidad de que un error persista sea razonablemente pequeña.

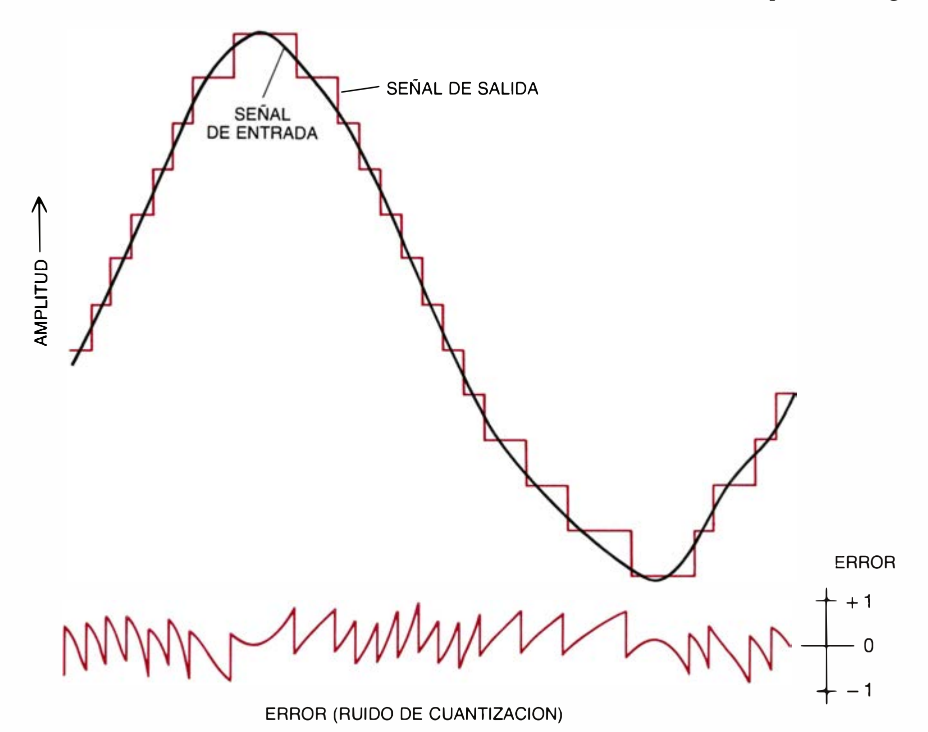
Con el fin de detectar la posible existencia de errores en unos determinados datos, la información grabada debe almacenarse temporalmente en una memoria dinámica. Esta memoria debe ser lo bastante grande como para almacenar todas las palabras de los datos y las palabras introducidas para localizar los errores. La introducción de los algoritmos utilizados en la búsqueda de errores y su fijación debe llevarse a cabo con una velocidad lo suficientemente alta como para que los datos corregidos abandonen la memoria dinámica a una velocidad aceptable para el sistema de grabación.

La mayoría de los sistemas de corrección de errores se basan en ciertas combinaciones de unas pocas estrategias básicas. La más simple de éstas confía en la fuerza bruta: cada palabra se repite una vez. Este método presenta algunos inconvenientes obvios; se duplica la cantidad de espacio necesario para el almacenamiento. Por otra parte, no es posible decidir cuál de las dos palabras es la correcta sin introducir algunas suposiciones adicionales.

Una de estas suposiciones puede basarse en el hecho de que una imperfección en el medio de grabación afectará a una parte de los datos cada vez, con el resultado de que todos los errores se concentrarán en una zona específica. Este fenómeno se conoce con el nombre de error de explosión; suele tener su origen en las imperfecciones del medio de grabación. Si las palabras y sus duplicados se dispersan a lo largo del proceso de grabación (fenómeno denominado interfoliación), el examen de los errores revelará cuál de las dos palabras es la incorrecta, dado que precisamente ésa tenderá a encontrarse rodeada por otras palabras igualmente incorrectas. Con el fin de que la redundancia sea una técnica eficaz de localización de errores, las palabras de control deben difundirse con suficiente amplitud y someterse a examen varios pares de palabras diferentes para así determinar los valores correctos en cada caso. Esta técnica requiere la utilización de una memoria dinámica muy grande y un algoritmo bastante complejo.

En la actualidad se dispone de otras muchas técnicas más elegantes que la que hemos descrito. Un método muy popular se basa en la generación de palabras de control con redundancia cíclica. (Esta técnica se conoce en las empresas de grabación como CRC, iniciales de "cyclic redundancy check".) Una de estas palabras puede formarse sumando dos palabras de datos para generar una palabra nueva que será un bit mayor que las originales. Cada palabra de datos se utiliza dos veces para formar una palabra de control; en cada ocasión se une con una palabra diferente. Si de estas tres palabras dos son correctas, la tercera puede colocarse. Incluso en el caso de que las tres palabras estén dañadas, es posible deducir los valores correctos correspondientes a partir de las otras sumas formadas. Por desgracia, el número de cálculos necesarios para llevar a cabo esta estrategia se incrementa notablemente, y es posible que no se disponga de tiempo suficiente para realizarlos.

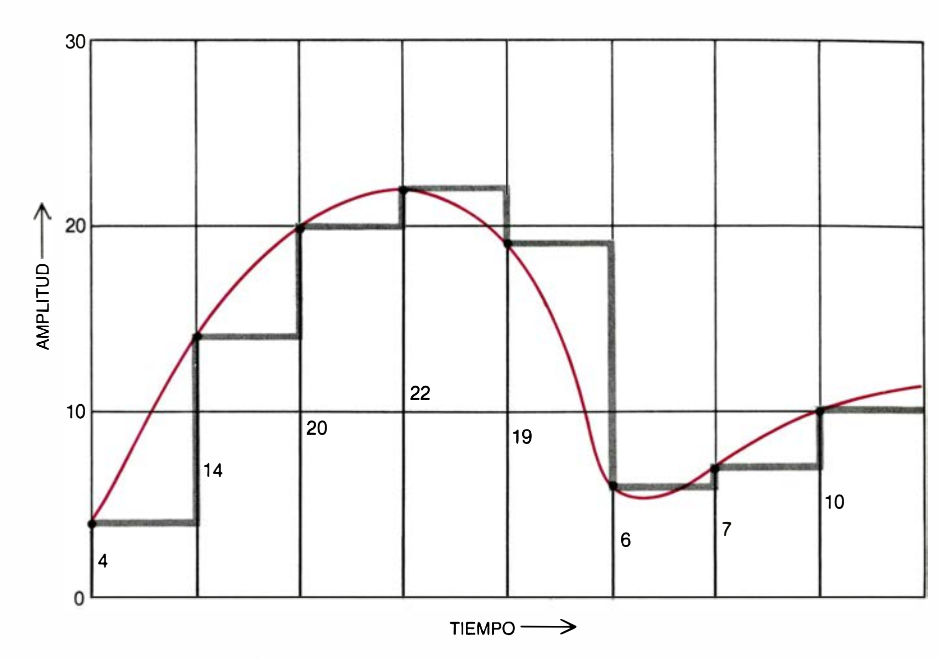
Otro método es el de la comprobación de la paridad. Este es un método corriente de corrección de errores en la industria de los ordenadores. Se suma un bit al mismo tiempo a dos palabras diferentes, sin llevar a cabo una operación de transporte, cuando normalmen-



9. EL RUIDO DE CUANTIZACION es la diferencia entre una señal analógica real (*línea negra continua*) y su representación digital (*línea coloreada escalonada*). Los errores nunca son mayores que el tamaño del escalón. La diferencia entre la señal de salida y la señal original constituye un ruido debido a que su amplitud es pequeña y su forma es diferente de la forma de las señales que lo han originado. Al contrario de lo que sucede con el ruido en un sistema analógico, esta forma de ruido está ausente cuando la señal también lo está. El resultado es un zumbido que sólo se produce en presencia de un sonido grabado. El ruido se enmascara introduciendo una señal analógica de pequeña amplitud que lo anula.

te habría que hacerlo así. El resultado de la operación es una palabra nueva que tiene el mismo número de bits que las palabras originales. En el caso de que alguna de las tres palabras sea errónea, las dos restantes servirán para calcular la tercera. Los resultados se pueden obtener en un solo ciclo del ordenador; esto hace que el control de paridad sea una herramienta extraordinariamente útil.

Existen muchas combinaciones posibles de estas técnicas y de otras con ellas relacionadas. Todas estas combinaciones entrañan ciertos compromisos entre el espacio de almacenamiento necesario, la probabilidad de que un error pase por alto y la rapidez con que los errores pueden corregirse. A fin de garantizar la compatibilidad, es necesario desarrollar un método convencional para un medio de almacenamiento dado.



10. UNA VEZ CORREGIDO, se envía el flujo de datos a un convertidor digital-analógico. En este instrumento, los valores analógicos representados por los números obtenidos en el muestreo original se generan a intervalos de tiempo adecuados (la frecuencia del muestreo original) para dar lugar a una señal continua en escalera (*gris*). Un filtro elimina los bordes de esta escalera, debidos a la naturaleza discreta de los datos digitales. Procediendo así, se obtiene una señal de salida (*color*) parecida a la onda original.

Corrección de fallos

Puesto que cada medio posee unos tipos de error determinados, se puede seleccionar un método diferente para cada formato. El método utilizado por el Disco Compacto corrige errores de explosión de hasta 14.000 bits. Los errores producidos al perforar un orificio de 2 milímetros en el disco se enmiendan con pleno éxito y se obtiene así una salida perfecta. Se puede estimar que tan sólo una de cada 20.000 palabras erróneas posee alguna probabilidad de atravesar el sistema sin ser detectada.

A fin de obtener copias sin errores, todas las corrientes de datos deben decodificarse, corregirse y, finalmente, codificarse de nuevo con el formato de la copia, incluso en el caso de que ésta sea idéntica al original. Siempre que no se deslicen errores a lo largo de todo este proceso, la copia sonará idéntica al original. Por otra parte, una grabación original (*master*) gastada puede "restaurarse" mediante una de estas operaciones de copia. Este proceso puede repetirse tantas cuantas veces se quiera; la copia obtenida en cada generación será indistinguible de la primera. Por el contrario, un grabador analógico iría acumulando ruido y distorsión con cada nueva generación.

En algunas ocasiones, las palabras originales y las palabras de control han sido hasta tal punto dañadas que, aunque el correspondiente error sea detectado, no puede corregirse. En este caso, se puede recurrir a alguna forma de encubrimiento del error. El método más fácil (pero también el más drástico) consiste en enmudecer la salida. La mayoría de los sistemas proceden de este modo cuando encuentran una secuencia larga de datos ininteligibles.

Una solución preferible a la anterior se basa en sintetizar una palabra nueva para reemplazar la perdida. Aunque la falsificación de material es inaceptable en el mundo de los ordenadores, es una práctica muy antigua y ampliamente utilizada entre los músicos al copiar con un lapso de memoria. Una aproximación consiste en repetir la palabra precedente. Dado que las señales musicales se mantienen relativamente constantes de una a la siguiente, esta técnica de encubrimiento de errores resulta perfectamente aceptable.

Una práctica más compleja se basa en interpolar un valor entre la palabra precedente y la siguiente. Esta técnica exige la utilización de un breve algoritmo para calcular el valor medio. Aunque este algoritmo es sencillo, debe llevar a cabo su trabajo antes de que la palabra del dato haya abandonado la memoria dinámica.

Para corregir los datos dañados se dispone también de otros medios más complejos. Uno de estos métodos se conoce con el nombre de autocorrelación. Este método consiste en una intensificación de la imagen y se utiliza para eliminar el ruido de las imágenes digitalizadas enviadas a la Tierra por los vehículos espaciales. La autocorrelación es una herramienta matemática muy versátil, capaz de separar una señal en dos partes; una de ellas contiene los componentes que presentan una cierta regularidad (la señal) y la otra contiene los componentes al azar (el ruido). Un ordenador digital puede aplicar este algoritmo, o cualquier otro, a una audioseñal digitalizada. Incluso en el caso de que el algoritmo sea demasiado grande y complejo para utilizarse durante una interpretación musical durante el desarrollo de ésta, puede servir para restaurar una grabación seriamente dañada.

Oportunidad para compositores

Se recurre a los algoritmos matemáticos también para modificar datos no dañados; en este caso, la señal se procesa con el fin de obtener determinados efectos musicales o sonoros. La modificación puede consistir en un cambio en el equilibrio entre graves y agudos, la adición de reverberación o la mezcla de dos o más señales. Es también posible hacer que la señal sea más rápida o más lenta sin cambiar el tono, o modificar el tono sin cambiar el tempo. Por supuesto, será posible procesar señales de formas todavía no imaginadas lo que abre nuevas perspectivas de creación para los compositores.

Los compositores no se verán limitados por las nuevas formas de procesamiento de la señal. Con las técnicas digitales ya es posible, en la actualidad, generar sonidos utilizando el ordenador como sintetizador musical. La variedad de sonidos musicales y efectos especiales de que disponen los compositores que emplean programación de ordenador para generar música digital es teóricamente infinita.

Detección de la presa en el escorpión de la arena

Este cazador nocturno del desierto de Mojave meridional no ve ni oye los insectos de los que se alimenta; para la caza se vale de sus receptores, extraordinariamente sensibles a las menores perturbaciones de la arena

Philip H. Brownell

Hace varios años, Roger D. Farley, de la Universidad de California en Riverside, y el autor observaban sobre una duna de arena del desierto de Mojave meridional, cerca de Palm Springs, el comportamiento alimentario de los escorpiones de arena. El sol se había puesto poco antes. De vez en cuando, una polilla atraída por nuestros faroles tocaba la arena cerca de algún escorpión, que se giraba rápidamente y corría hacia la misma; pocas veces fallaba la captura. Pareja respuesta se inducía tocando suavemente la arena con un palito. Por el contrario, el vuelo de las polillas, aunque fuera a pocos centímetros del escorpión, no atraía su atención. Según parece, esos animales no respondían a las señales visuales ni auditivas, pero sí percibían las vibraciones mecánicas de la arena y extraían de ellas la información precisa para localizar las presas.

Se sospechaba ya que el escorpión de la arena, *Paruroctonus mesaensis*, empleaba un mecanismo insólito de detección de las presas. Por varias razones. En primer lugar, se trata de un artrópodo bastante primitivo (el tipo, o *phylum*, Artrópodos agrupa, entre otros, a insectos, arácnidos y crustáceos) que carece de los refinados sentidos de la vista, oído y olfato que guían a otros depredadores hacia sus presas. En segundo lugar, los escorpiones son animales nocturnos, que salen de sus madrigueras sólo por la noche, para comer y aparearse. Dada su poca capacidad visual, es improbable que la información facilitada por la visión pudiera explicar su eficacia como cazadores nocturnos. Finalmente, uno de los ejemplos más espectaculares de las proezas cazadoras de esta especie de escorpión es su habilidad para detectar presas subsuperficiales, a las que exhuma con sus largas pinzas, los pedipalpos. Ciertamente, un escorpión no podría ver, oír u oler un insecto enterrado.

Aún así, sorprendió la hipótesis de que el escorpión quizá localizara a sus víctimas percibiendo las vibraciones que éstas generan en la arena. Los biólogos que estudian el comportamiento daban por supuesto que los animales podían ser alertados por los movimientos del sustrato, pero no que supieran determinar con justeza la naturaleza y la localización de la perturbación, del mismo modo que los seres humanos no pueden fijar con precisión el epicentro de un terremoto cuando tiembla el suelo. Tal incapacidad contrasta con la aguda sensibilidad de muchos animales frente a las ondas sonoras transmitidas por el aire o el agua. En esos medios, los animales localizan el origen de una señal detectando e interpretando minúsculas diferencias en el tiempo o amplitud de estimulación de sensores separados espacialmente. En los sólidos, las perturbaciones mecánicas viajan mucho más deprisa y sus longitudes de onda son más largas. Las diferencias en tiempo de llegada y amplitud en los sensores de un animal son, por tanto, mucho más sutiles. De hecho, lo son tanto que los biólogos juzgaban al sistema nervioso incapaz de detectarlas y analizarlas.

Parecía la arena un medio escasamente adecuado para transmitir información utilizable: atenuaba fuertemente los movimientos mecánicos, según se creía. El éxito del escorpión en su conducta de caza constituía, por tanto, un enigma, que decidimos resolver estudiando en detalle el comportamiento del animal, en primer lugar observándolo en el campo. Para analizar posteriormente el mecanismo de la detección de presas y elucidar las propiedades de la arena que lo hacen factible habría que realizar experimentos en el ambiente controlado del laboratorio.

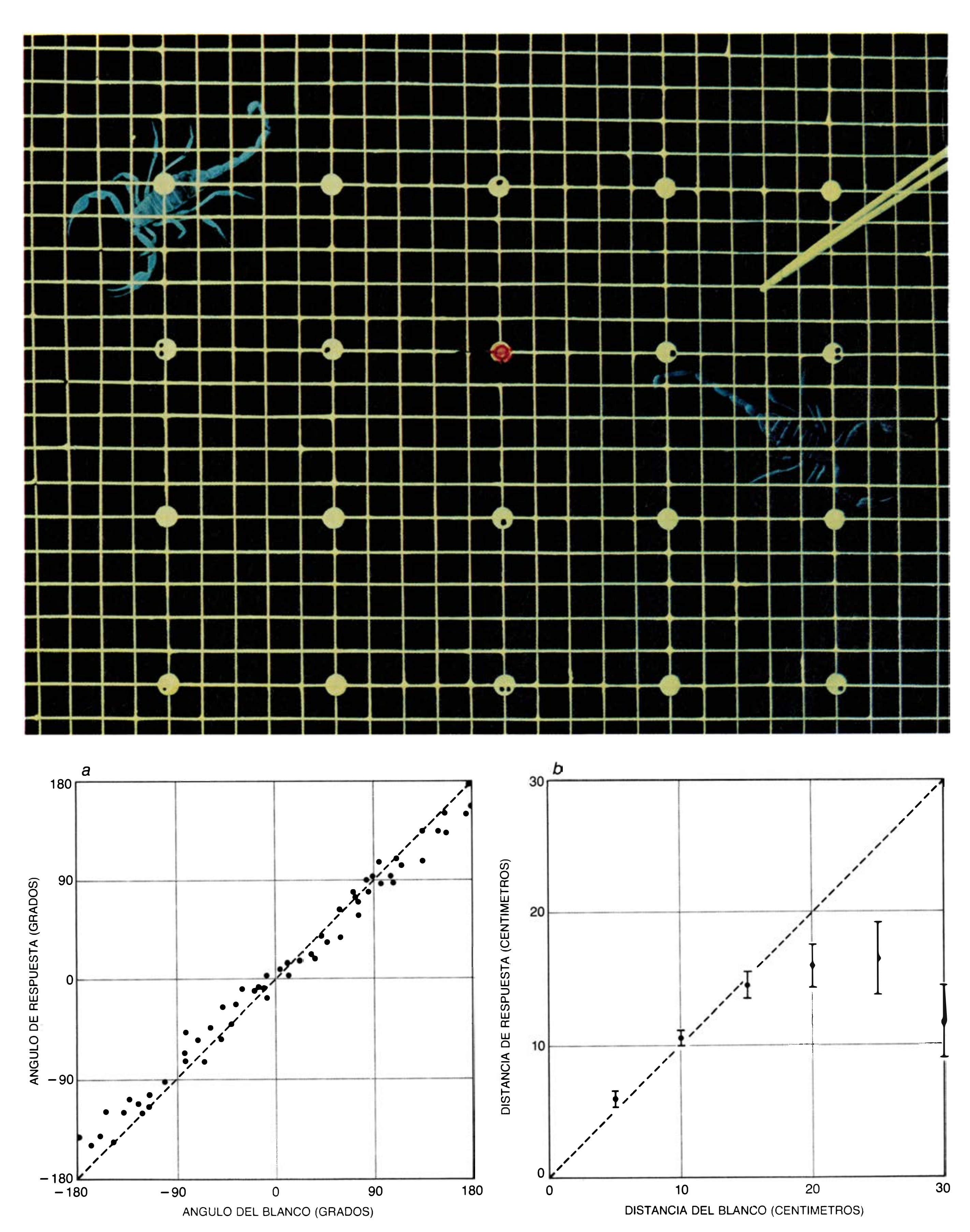
El hábitat del escorpión de arena, el desierto de Mojave meridional, es uno de los ecosistemas más cálidos y secos de Norteamérica. Hay días de verano en los que la temperatura en la superficie de las dunas sobrepasa los 70 grados Celsius y la humedad relativa se aproxima a cero. Sin embargo, la arena absorbe suficiente humedad para mantener arbustos resistentes a la sequía, como el mezquite, así como varias especies de hierbas anuales. Esas plantas estabilizan las dunas frente al viento y proporcionan agua y alimento a una variada fauna.

La mayoría de los animales de las dunas son artrópodos nocturnos. Durante el día, esos arácnidos e insectos se libran de las condiciones desecantes de la superficie "nadando", es decir, excavando en la arena; a una profundidad de unos 10 centímetros la temperatura desciende hasta unos tolerables 40 grados Celsius y la humedad ronda el 90 por ciento. Gary A. Polis, de la Universidad Vanderbilt, ha encontrado que el escorpión de arena es uno de los artrópodos de las dunas más comunes, así como uno de los mayores, pues alcanza una longitud de ocho centímetros y un peso de cuatro gramos a lo largo de los cinco a seis años que dura su vida. Ocupa por ello una posición terminal en la cadena alimentaria. Por regla general, el escorpión come cualquier cosa que pueda sujetar durante el tiempo suficiente para paralizarla con el aguijón neurotóxico del extremo de su cola: gran diversidad de insectos, así como miembros menores de su propia especie, que forman la mayor porción de su dieta.

En una típica noche de caza, el escor-



1. ESCORPION DE LA ARENA, arácnido que ocupa una posición terminal en la cadena alimentaria de las dunas del desierto de Mojave. En su madurez alcanza los ocho centímetros de longitud y pesa hasta cuatro gramos. Se alimenta de insectos y otros artrópodos, que captura con sus largas pinzas (los pedipalpos) y paraliza mediante el aguijón neurotóxico del extremo de la cola. La fotografía, tomada por la noche, ilustra una característica insólita de la cutícula del escorpión: es fluorescente cuando recibe radiación ultravioleta, fenómeno que facilita el estudio in situ de su comportamiento depredador.



2. FOTOGRAFIA A EXPOSICION, realizada en el campo, durante la noche y bajo radiación ultravioleta. Muestra la respuesta de un escorpión frente al golpeteo suave de la arena con un bastón: el animal gira rápidamente y se desplaza hacia la perturbación. Si su respuesta no le lleva hasta el blanco, el escorpión espera a que éste se mueva de nuevo. Cada cuadrado de la rejilla fluorescente superpuesta mide un centímetro de lado. Por repetición del ensayo cabe medir la precisión del escorpión a la hora de estimar el ángulo y la distancia a las perturbaciones del sustrato que imitan las que producirían las presas. A una distancia de ocho a 10 centímetros los animales se dirigen hacia el blanco con gran precisión: en la mayoría de las pruebas el ángulo de respuesta es casi igual al ángulo que forma el escorpión con el blanco (*a*). Los escorpiones son también diestros a la hora de estimar la distancia al blanco, siempre que éste se halle a 15 centímetros o menos (*b*). A distancias mayores, la respuesta se desvía significativamente de la mejor, y es más variable.

pión sale de su madriguera y se sitúa en la arena circundante, en una posición algo elevada, al acecho de la presa que pase a distancia de ataque. Si no tiene éxito, permanece inmóvil durante horas antes de retornar a su madriguera por uno a varios días. Stanley D. Yokota, de la Universidad de Arizona, ha demostrado que el escorpión se adapta a un bajo ritmo de cobro de piezas "desconectando" su metabolismo mientras permanece inactivo en la madriguera. Sobrevive así varias semanas, e incluso meses, con una sola comida.

Cuando una presa adecuada penetra en el territorio del escorpión, el comportamiento de éste cambia de forma espectacular. Exhibe primero una respuesta de alerta: los pedipalpos, o pinzas con las que captura las presas, se abren y se extienden hacia delante al tiempo que separa el cuerpo de la arena, levantándolo. Cada movimiento subsiguiente de la presa desencadena una respuesta de orientación, en la que el escorpión gira rápidamente sus pedipalpos hacia la presa y se desplaza varios centímetros, acercándose a ella. Si los pedipalpos no logran hacer contacto, el escorpión reposa, inmóvil, hasta que la presa se mueve de nuevo. Una secuencia de persecución suele durar pocos segundos, y contempla de una a cinco respuestas de orientación, todas ellas precedidas claramente de un período de inmovilidad durante el cual la presa ha de perturbar la arena para que el escorpión reaccione.

Ejemplo particularmente notable de la capacidad de acecho del escorpión se observa en su persecución de la cucaracha excavadora del desierto, *Arenivaga investigata*, un insecto comedor de raíces que excava túneles justo por debajo de la superficie de la arena. Cuando la cucaracha cava en un radio de medio metro alrededor de un escorpión que caza, éste responde con la secuencia usual de movimientos de orientación hasta que se halla directamente sobre la presa. En ese punto, los movimientos subsiguientes de la cucaracha quizá confundan al escorpión, que gira en círculos y se abalanza a uno y otro lado como si persiguiera presas superficiales. Pasados unos pocos segundos, sin embargo, su comportamiento cambia; levanta la parte posterior de su cuerpo y clava repetidamente sus pedipalpos en la arena, hasta tocar y agarrar la cucaracha. Exhuma entonces el escorpión su presa con el mismo movimiento rotatorio que emplea para excavar una madriguera.

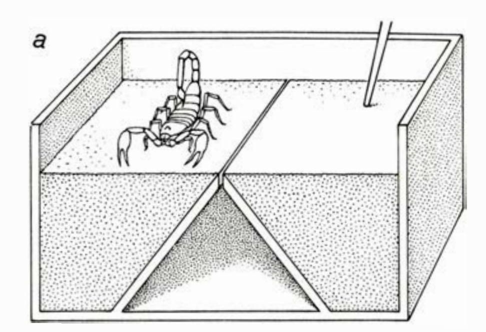
El hábito nocturno de los escorpiones parecería dificultar la estimación del alcance y precisión con que localiza las presas. Afortunadamente, la cutícula del animal presenta una característica única: iluminada con radiación ultravioleta, emite un brillo fluorescente de luz amarilloverdosa, que lo hace visible desde varios metros de distancia. Para medir el comportamiento del escorpión dispusimos, sobre un mismo trípode, una luz negra y una cámara, bajo la cual colocamos una rejilla fluorescente de referencia. Podíamos así instalar el trípode sobre un escorpión a la caza y recoger, en fotografías a exposición, las respuestas de orientación del animal a perturbaciones semejantes a las que producen las presas (ligeros toques de la arena con un bastón).

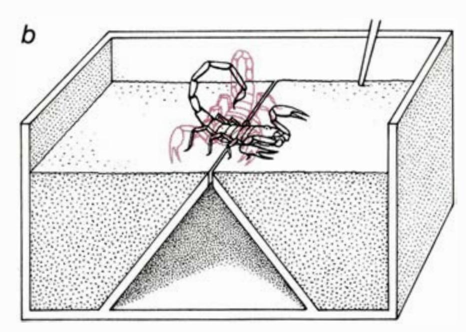
Nuestras mediciones demostraron que los escorpiones detectan perturbaciones hasta una distancia de 30 centímetros. A distancias de 10 centímetros o menos sus estimaciones de ángulo y distancia al blanco son prácticamente perfectas: su primera respuesta a la perturbación les conduce directamente al blanco. ¿Cómo lo consiguen?

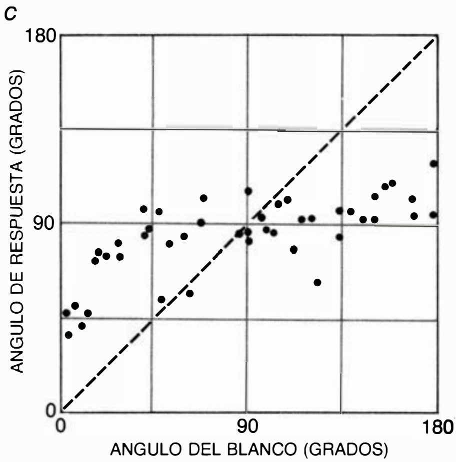
Para averiguarlo decidí estudiar el comportamiento de orientación del escorpión en el laboratorio, metodología que presentó un nuevo problema: encerrado en un terrario, el escorpión no muestra la menor inclinación a la caza. Por suerte, el animal exhibe otro comportamiento de orientación de fácil estudio. Normalmente, el escorpión huye de las situaciones de amenaza. Sin embargo, si se ve muy acosado levanta la parte posterior de su cuerpo y dirige el aguijón, arqueándolo sobre su cabeza, hacia el estímulo amenazador. Cualquier perturbación ulterior del sustrato despierta un giro violento en dirección al estímulo, como ocurre en la respuesta depredadora, pero sin movimiento de avance.

Una serie de experimentos que explotaban esta respuesta de orientación defensiva confirmaron nuestra impresión de que los estímulos visuales y aurales no guían el comportamiento de orientación. Cubrir los ocho ojos del animal con pintura opaca no alteró su sensibilidad frente a estímulos de amenaza ni la precisión con que se volvía hacia ellos. Colocar baldosas insonorizantes entre el estímulo y el escorpión tampoco afectó su respuesta.

Por el contrario, cuando bloqueamos la transmisión de ondas mecánicas por la arena, dividiendo el sustrato en dos porciones separadas por una ranura sin arena, el comportamiento del animal cambió, si bien la ranura no interfería las señales visuales ni auditivas. Si

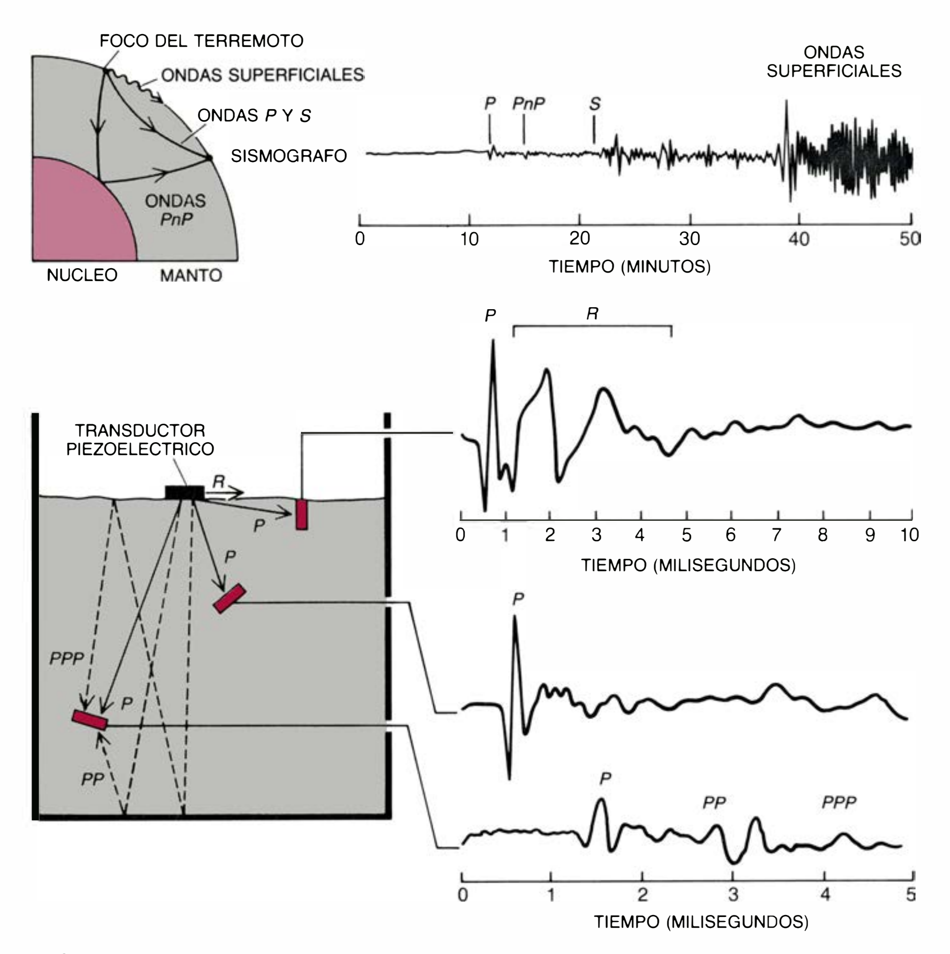






3. EXPERIMENTOS DE RANURA: demuestran que los escorpiones responden a las vibraciones del sustrato y no a señales visuales o auditivas a la hora de localizar a sus presas. Un escorpión situado a un lado de la ranura, que bloquea la transmisión de vibraciones por la arena, no muestra respuesta alguna a una perturbación provocada a varios centímetros en el lado opuesto (*a*). Cuando sus patas izquierdas están en contacto con el sustrato estimulado (*b*), el escorpión gira hacia la izquierda, pero el ángulo de giro está muy sesgado en la dirección del ángulo de 90 grados (perpendicular al intervalo de aire), sea cual fuere el ángulo del blanco (*c*). Se deduce de ello que el animal precisa la información sensorial de todas sus patas para discernir con precisión la dirección del blanco.

se colocaba un escorpión asustado a un lado y en el otro se presentaba un estímulo, el escorpión no mostraba respuesta alguna por mucho que la perturbación se provocara sólo a unos pocos centímetros de distancia. Sin embargo, si al menos una de las patas del escorpión tocaba el sustrato del lado estimulado, el animal se volvía de inmediato hacia ese lado. Esta prueba simple confirmó que el escorpión tenía que hallarse en contacto con el sustrato perturbado para detectar el estímulo.



4. ONDAS MECANICAS procedentes de un terremoto; se detectan en sismógrafos situados a miles de kilómetros del foco (*arriba*); el mismo tipo de ondas se propaga a cortas distancias a través de la arena en respuesta a las vibraciones sutiles de un transductor piezoeléctrico (*abajo*). Los terremotos emiten dos tipos de ondas internas, de compresión (*P*) y de cizalla (*S*), y dos tipos de ondas de superficie, Rayleigh y Love. Las ondas *P* son las que más rápido viajan y por ello llegan primero al sismógrafo, seguidas por sus reflexiones sobre el núcleo de la Tierra (*PnP*), y luego por las ondas de cizalla y las ondas superficiales. La arena conduce sólo las ondas *P* y las Rayleigh. Ambas las detecta un sensor piezoeléctrico (*color*) colocado en la superficie de la caja de arena. A profundidades de seis y 19,5 centímetros sólo se detectan las ondas *P*, pero la arena las conduce lo suficientemente bien para que puedan medirse sus reflexiones.

Además, el ángulo de la respuesta defensiva dependía sólo de la combinación de patas que tocaban la superficie estimulada. Por ejemplo, cuando las patas derechas y las izquierdas se hallaban en lados opuestos, la estimulación de la arena a diversos ángulos a la izquierda del escorpión siempre desencadenaba giros a la izquierda, pero con un fuerte sesgo en una dirección perpendicular a la ranura. Esta no disminuía la sensibilidad del escorpión a las vibraciones, sino que reducía la precisión con la que el animal fijaba la dirección del origen. Las respuestas sugerían que de ordinario el escorpión determina el ángulo de giro integrando la información que llega a todas sus patas. Al eliminar selectivamente parte de la información, desorganizábamos sistemáticamente la percepción que el animal tenía de la dirección del origen.

Los experimentos de la ranura demostraron que el escorpión obtiene la información que necesita para localizar a la presa a partir de señales transmitidas a través del sustrato, y que probablemente detecte esas señales mediante sensores localizados en las patas. Todavía quedaba por determinar la naturaleza de los sensores y, antes que eso, la naturaleza de las señales mecánicas portadoras de información que se transmiten por la arena.

La última cuestión era particularmente intrigante, porque durante mucho tiempo los geofísicos, fundados en una doble razón, han considerado que la arena es un mal conductor de ondas mecánicas. En primer lugar, la arena es un medio granular, disgregado, en el que las partículas vecinas no se hallan pegadas rígidamente unas a otras. Mientras que en un sólido agregado, como una roca, la tensión aplicada a una partícula se desplaza a la siguiente y el desplazamiento se propaga como una onda elástica, en la arena la energía cinética se disipa rápidamente en forma de fricción, porque los granos pueden deslizarse los unos respecto de los otros. Esta forma de inelasticidad tiende a amortiguar, en particular, las oscilaciones de baja frecuencia y de longitud de onda larga.

En segundo lugar, a frecuencias más elevadas las longitudes de onda se hacen tan cortas que se acercan a las dimensiones de los granos de arena. Los granos reflejan y dispersan tales señales, filtrando eficazmente los componentes de alta frecuencia de la onda que se propaga. Por combinación de ambos efectos (amortiguamiento de las frecuencias bajas y dispersión de las altas) la arena sólo transmite, en todo caso, ondas mecánicas comprendidas en una estrecha gama de frecuencias.

Pero era evidente que los escorpiones recibían alguna señal, de modo que decidí investigar con más detalle las propiedades conductoras de la arena. Al efecto coloqué sismómetros piezoeléctricos (discos de cristal de cuarzo que generan una corriente eléctrica cuando se aplica presión a sus lados planos) a varias profundidades y en la superficie de una caja de arena. Empleé otro transductor piezoeléctrico para generar un tren repetible de movimiento del sustrato a cierta distancia de los sismómetros. Los primeros registros confirmaron lo que el comportamiento del escorpión ya había sugerido: a distancias de hasta varios centímetros, la arena es un conductor razonablemente bueno de las vibraciones mecánicas.

Sin embargo, todavía quedaba por determinar exactamente qué era lo que los sismómetros registraban. A través de un cuerpo sólido pueden propagarse cuatro tipos de ondas elásticas. Dos de ellas, las ondas de compresión y de cizalladura, son internas: se propagan en forma de frentes esféricos en expansión a través del cuerpo del medio. Las ondas de compresión (sonido) provocan en las partículas una oscilación adelante y atrás en la dirección de propagación de las ondas, mientras que las ondas de cizalladura generan un movimiento perpendicular a la dirección de desplazamiento. Los otros dos tipos de perturbación elástica se propagan por la superficie. De éstos, sólo las ondas de Rayleigh nos interesan aquí: hacen que las partículas describan una elipse retrógrada en un plano perpendicular a la superficie y paralelo a la dirección de desplazamiento.

Los detectores piezoeléctricos registraron dos señales fuertes que se propagaban a través de la caja de arena: una onda relativamente rápida conducida a

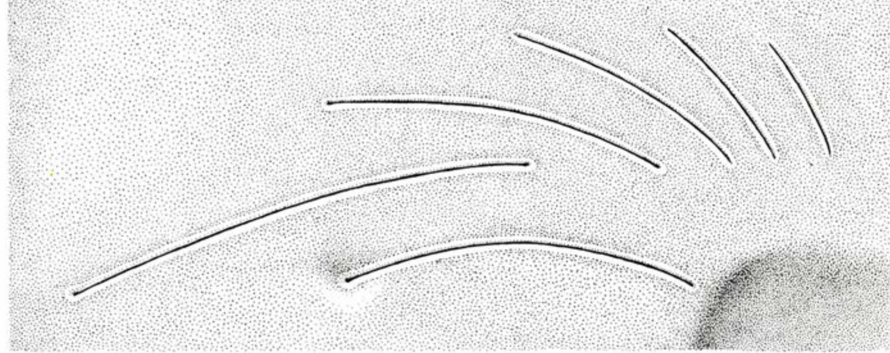
la vez a lo largo de la superficie y por debajo de ella, y otra onda, más lenta, que sólo se registró en la superficie de la arena. Orientando el eje sensible de los detectores en varios ángulos pude identificar los movimientos de las partículas asociadas con cada una de las ondas. La onda rápida era de compresión y la superficial, más lenta, una onda de Rayleigh. No se detectaron movimientos de partículas que respondieran a la propagación de ondas de cizalladura, circunstancia nada sorprendente: la conducción de ondas de cizalladura depende por entero de fuerzas que restituyen la forma entre partículas vecinas, probablemente mínimas en un medio granular como la arena.

Así, contrariamente a su reputación como medio muy absorbente, la arena conduce al menos dos tipos de ondas. Además, las propiedades físicas de estas señales (su gama de frecuencias y velocidades de propagación) eran tales que animales con receptores sensoriales adecuados podrían detectar y extraer información de las mismas desde varios centímetros de distancia.

Para determinar hasta qué punto las ondas de frecuencias y longitudes de onda distintas se propagan bien por la arena, analicé las formas ondulatorias de las señales de compresión registradas a diversas distancias de un origen de señales constante. Este procedimiento, denominado análisis de Fourier, permite determinar el grado con que las distintas frecuencias que constituyen una señal compleja se atenúan a medida que dicha señal se propaga a través del medio. Encontré que la arena actuaba como un conductor razonablemente bueno de las ondas mecánicas en la amplitud de banda que va de los 0,1 a los cinco kilohertz. En particular, las frecuencias dominantes de las señales registradas relativamente lejos del origen se acercaban a un kilohertz, frecuencia a la que la mayoría de los mecanorreceptores animales resultan muy sensibles. Además, en la arena las longitudes de onda que corresponden a esas frecuencias son suficientemente cortas (unos pocos centímetros) para que animales pequeños como los escorpiones distingan los diferentes tiempos de llegada de la onda a sus receptores.

Quizá la característica más sorprendente de las señales fuera su reducida velocidad de transmisión. La alta velocidad de las ondas elásticas en la mayoría de los demás sólidos naturales es una de las principales razones por las que los etólogos han tendido a descartar las vibraciones del sustrato como

BASITARSO
SENSILIO DE HENDIDURA BASITARSAL
PELOS TARSALES
TARSO



5. DOS TIPOS DE MECANORRECEPTORES del segmento tarsal (terminal) de la pata del escorpión son sensibles a las vibraciones del sustrato. Los pelos que se proyectan de los lados y de la parte inferior del tarso descansan sobre y entre los granos de arena. El sensilio de hendidura basitarsal, formado por repliegues de la cutícula, es particularmente sensible a las vibraciones que comprimen las hendiduras en una dirección perpendicular a su eje longitudinal; detecta movimientos del sustrato de sólo un angstrom.

signos potenciales de orientación. La velocidad elevada, al igual que la longitud de onda larga, evita que un animal detecte diferencias en el tiempo de llegada o de amplitud en los distintos receptores, lo que impide utilizar esas características para localizar el origen de la señal. Sin embargo, las mediciones mostraron que la velocidad de la onda de compresión en arena superficial suelta era sólo de unos 120 metros por segundo, menos de la mitad de la velocidad del sonido en el aire; en arena compacta era de alrededor de 200 metros por segundo, valores aproximadamente un orden de magnitud más lentos que la velocidad de las ondas sonoras en la mayoría de los demás sólidos. Las ondas de Rayleigh en la arena viajan todavía más despacio, a unos sorprendentes 40 o 50 metros por segundo.

Así, tanto las ondas de compresión como las de Rayleigh eran susceptibles de detección por parte de los escorpiones, y de posterior análisis para localizar la presa. El paso siguiente era descubrir qué vibraciones percibía en verdad el animal y con qué receptores.

Un lugar razonable donde buscar sensores de vibración eran los segmentos tarsales de las patas (los "pies"), porque nuestros estudios habían demostrado que éstos eran la única parte del cuerpo que necesariamente debía establecer contacto con el sustrato para que el escorpión lograra orientarse. Las ocho patas presentan diversas estructuras cuticulares que pueden actuar de mecanorreceptores. A saber: sensilios pilosos, espolones, uñas y una estructura peculiar denominada sensilio de hendidura, común a todos los Arácnidos. El sensilio de hendidura era un candidato particularmente interesante porque la estructura homóloga en las arañas, el llamado órgano liriforme, mediaba, según se sabía, la extraordinaria sensibilidad de estos arácnidos a las vibraciones de la telaraña.

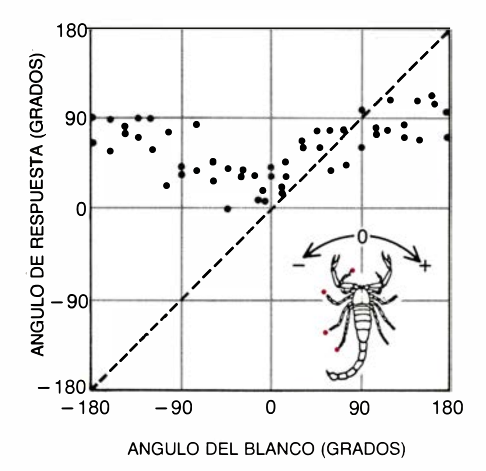
Fue fácil demostrar que los sensilios de hendidura tarsales constituían, en efecto, un elemento crucial del mecanismo de que se valía el escorpión para detectar su presa. Cuando se perforaban con una fina aguja todos los sensilios de hendidura tarsales, la conducta del animal era normal, con la excepción de que se había vuelto "sordo" a cualquier estimulación del sustrato que no fuera muy intensa. En cambio, de perforarse sólo los sensores de las patas izquierdas, el escorpión se comportaba de manera parecida a cuando se le colocaba a horcajadas sobre la ranura: tendía a girar 90 grados hacia la derecha, hacia los restantes sensores, cada vez que se perturbaba el sustrato. La semejanza de las dos pautas de comportamiento abonaba la idea de que la lesión de los sensilios de hendidura del lado izquierdo equivalía al bloqueo de las entradas sensoriales de ese lado.

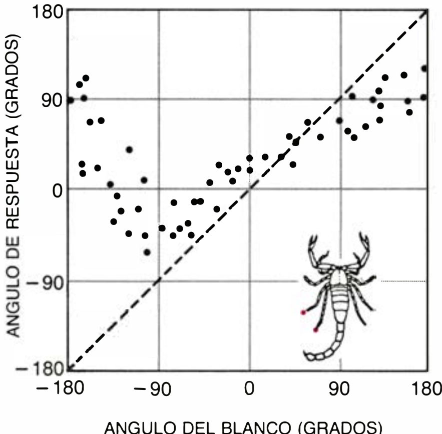
De forma similar, si sólo se rajaban dos hendiduras adyacentes la respuesta de orientación se mantenía razonablemente precisa, excepto para los blancos presentados cerca de esas patas. Finalmente, cuando se destruían todos los sensores menos dos adyacentes, el escorpión giraba invariablemente en la dirección de esos sensores, fuera cual fuese la posición del blanco. Resultaba evidente que la entrada sensorial procedente de todos los sensilios de hendidura era esencial para que el escorpión determinara con precisión la dirección de la fuente.

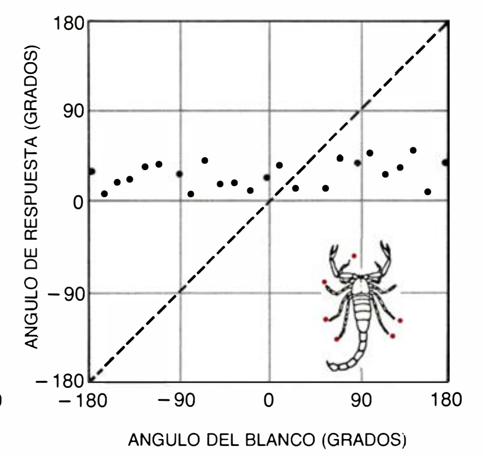
Puesto que las patas del escorpión son relativamente gruesas, pudo insertarse finos cables a los segmentos terminales y registrar los potenciales de acción, o señales bioeléctricas, transmitidas de los receptores al cerebro. Los registros mostraban potenciales de acción de dos tamaños. Los mayores se presentaban al inicio de la respuesta a la estimulación vibratoria; iban asociados a la llegada al tarso de las ondas de compresión, relativamente rápidas. Los potenciales de acción más pequeños aparecían más tarde en los registros, en conjunción con la llegada de las ondas de Rayleigh, más lentas.

Estimulando selectivamente los distintos mecanorreceptores tarsales aislé los que eran responsables de los dos tipos distintos de señales bioeléctricas. El potencial mayor era una respuesta a la estimulación de pelos sensoriales situados sobre el tarso, mientras que los menores se originan en los sensilios de hendidura; esto es, los pelos detectaban las ondas de compresión y, los sensilios de hendidura, la llegada de las ondas de Rayleigh.

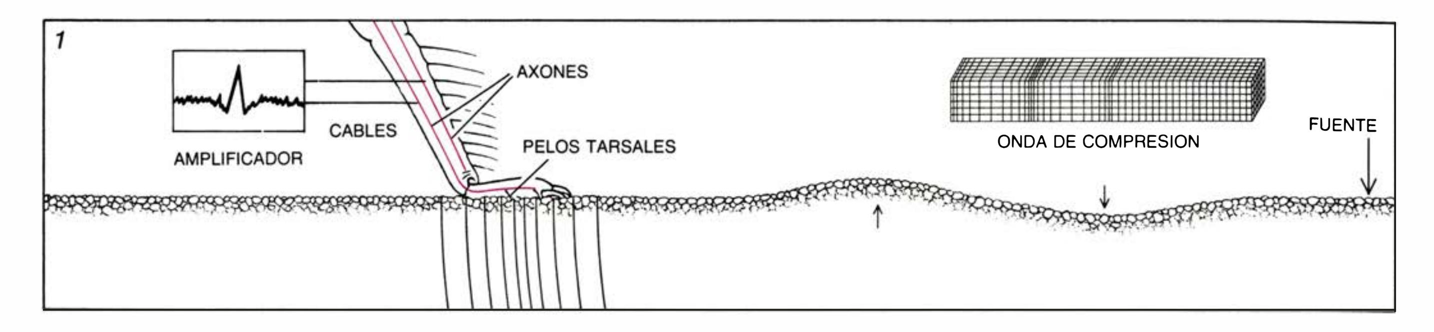
La distinta sensibilidad de los dos sensores se explica al considerar los movimientos de partículas asociados con las ondas que detectan. Friedrich G. Barth y sus colegas, de la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt, han demostrado que los sensilios de hendidura son particularmente sensibles a fuerzas que comprimen las hendiduras en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Eso hará justamente una onda de Rayleigh, por-

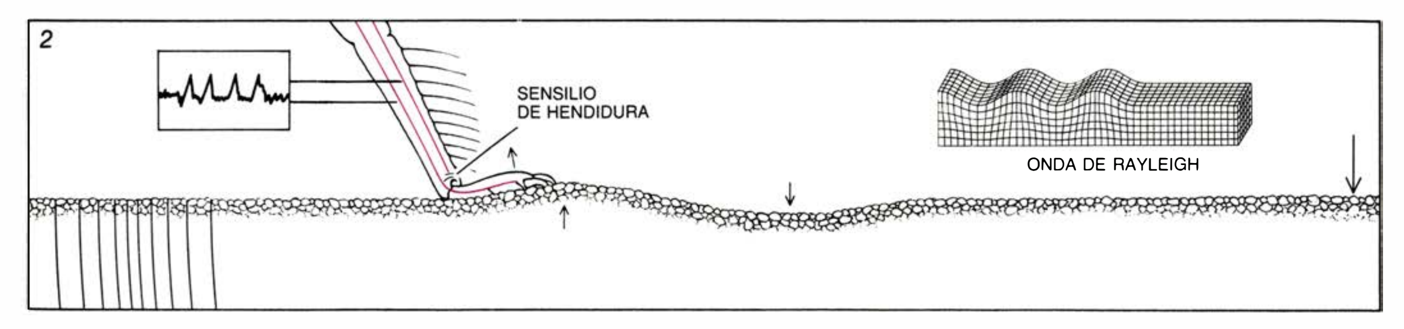






6. PAPEL CRUCIAL DE LOS SENSILIOS de hendidura en la determinación de la dirección del blanco. Se dedujo de experimentos en los que se perforaban algunos o todos los sensilios de hendidura (*puntos de color*) y se golpeaba el sustrato a distintos ángulos respecto del escorpión. Cuando se inactivan los sensilios de hendidura en las ocho patas a la vez, el escorpión queda "sordo" a las vibraciones del sustrato, a menos que éstas sean muy intensas. La ablación selectiva induce un sesgo (hacia las patas no dañadas) en el ángulo de la respuesta de giro del escorpión; el sesgo aumenta con el número de sensilios inactivados. Por ejemplo, cuando se dañan las cuatro patas de la izquierda (*izquierda*), el escorpión gira siempre hacia la derecha, aun cuando la perturbación proceda de la izquierda. Estas observaciones sugieren que el escorpión acostumbra a integrar la información que dan los ocho sensilios.





7. RESPUESTA MECANOSENSORIAL de un escorpión a ondas que se propagan por la arena; se observa insertando finos cables en los segmentos terminales de las patas y registrando las señales bioeléctricas (potenciales de acción) que se transmiten a lo largo del nervio de la pata. Un sensor piezoeléctrico (que no se ilustra) situado en la arena, cerca del tarso, registra las ondas. Al perturbar la arena, las señales que primero alcanzan el tarso son ondas de compresión (*1*), que estimulan los pelos tarsales; generan potenciales de acción de gran amplitud que ascienden por el nervio de la pata. Pocos milisegundos después (*2*), el movimiento vertical de las partículas asociado con las ondas de Rayleigh, más lentas, comprime el sensilio de hendidura, desencadenando señales de menor amplitud. La estimulación de los sensilios de hendidura por las ondas de Rayleigh parece constituir la base de la percepción de la dirección del blanco por parte del escorpión; estima éste la distancia a partir de la demora entre la estimulación de ambos tipos de mecanorreceptores.

que su movimiento vertical desplaza hacia arriba el segmento terminal de la pata. Los sensilios pilosos, en cambio, se proyectan de los lados y de la parte inferior de la pata y se introducen en la arena, de modo que se hallan dispuestos para detectar el movimiento horizontal de las partículas que producen las ondas de compresión.

La localización de la presa requiere algo más que la mera detección del movimiento de la arena; de alguna manera, el escorpión extrae información de las ondas y la utiliza para determinar la posición del origen de la perturbación. Puesto que el papel de los sensilios de hendidura es esencial a la hora de determinar la dirección del origen, es probable que las ondas de Rayleigh constituyan la señal vibratoria de la que se obtiene el ángulo del blanco. Pero nada hay en la anatomía o en la respuesta fisiológica de los sensilios de hendidura o de los pelos sensoriales que tenga carácter direccional. En otras palabras, los sensores de vibraciones del escorpión responden igualmente a ondas que llegan desde cualquier ángulo. De ahí que la determinación que el animal efectúa de la dirección de la presa deba implicar una comparación de las respuestas, a una misma onda, de dos sensores separados en el espacio.

Las ocho patas del escorpión adulto forman un "campo sensorial" aproximadamente circular de cuatro a seis centímetros de diámetro. El escorpión podría explotar de dos maneras esa superficie relativamente grande. En primer lugar, podría determinar la dirección del origen de una onda a partir de la demora de tiempo entre la estimulación de los sensores más cercanos al origen y la de los más alejados; es decir, el escorpión podría limitarse a girar en la dirección de los sensores que se estimulan primero. En un campo sensorial de cinco centímetros de diámetro, tal demora de tiempo sería de alrededor de un milisegundo para una onda de Rayleigh que se desplazara a 50 metros por segundo. Para una onda de compresión que se moviera a 150 metros por segundo, la demora sería de alrededor de 0,3 milisegundos. Muchos animales emplean demoras de tiempo menores para localizar el origen de ondas de compresión que se propagan a través del aire; los humanos, por ejemplo, sitúan fácilmente la dirección de una fuente sonora con demoras de tiempo de menos de 10 microsegundos entre los dos oídos.

En segundo lugar, el escorpión podría estimar la dirección del origen de una onda a partir de las diferencias de intensidad con la que la onda estimula los sensores. La amplitud de una onda decrece a medida que se propaga, en parte debido a que el frente de la onda se expande geométricamente, esparciendo la energía de la onda, y en parte porque la señal es absorbida por el medio. Los sensores más cercanos al origen recibirían, por tanto, un estímulo más potente.

Para averiguar cuál de los dos tipos de señales era más importante para el escorpión, construí una plataforma dividida en la mitad por una estrecha abertura. Cada mitad de la plataforma podía vibrar independientemente impulsada por su propio estimulador mecánico. Disponiendo un escorpión a horcajadas sobre la abertura se podían variar de manera independiente la sincronía y la intensidad de las vibraciones que llegaban a sus patas izquierdas y derechas.

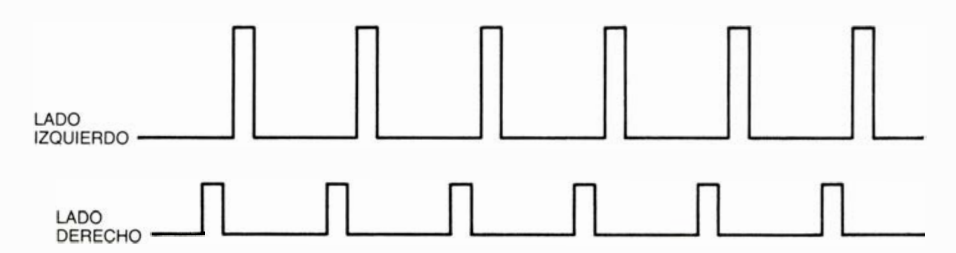
El montaje experimental me permitió plantearle un dilema al escorpión. En las situaciones naturales, las patas más cercanas al origen de una onda se estimulan en primer lugar, y más intensamente. Sin embargo, dividiendo en dos la plataforma se podía excitar primero las patas derechas, pero con una intensidad de sólo la mitad de la que recibían las patas izquierdas, forzando con ello al escorpión a que eligiera la señal más importante. Repetidamente, el escorpión se volvía hacia la derecha, independientemente de la intensidad del estímulo que alcanzara las patas iz-

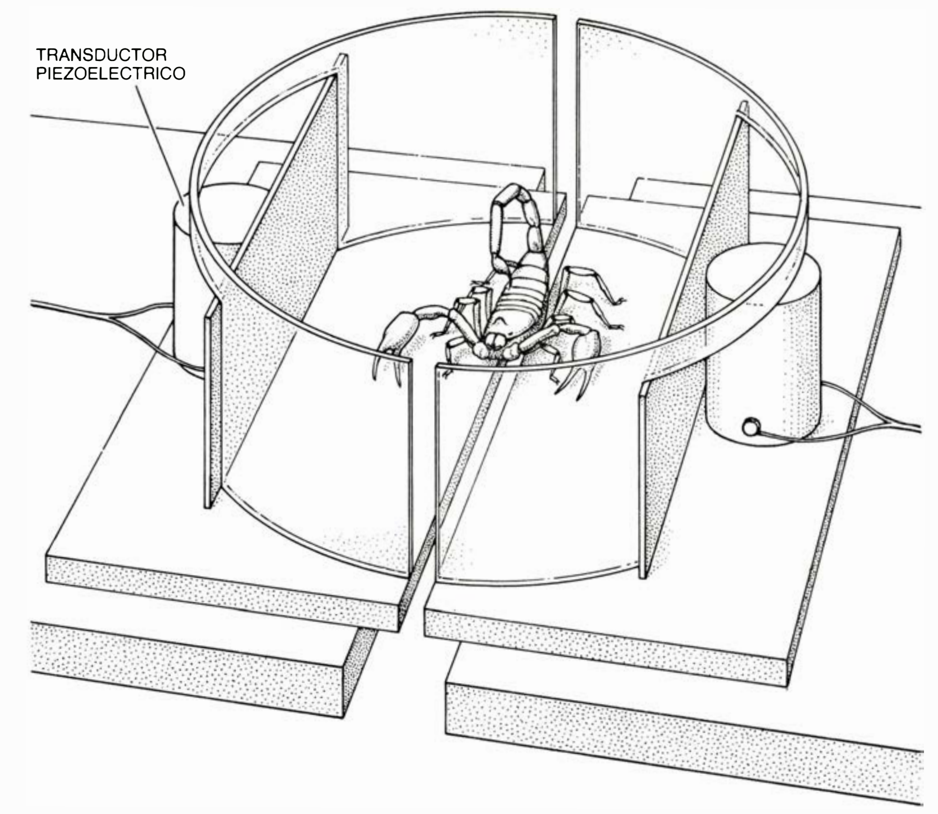
quierdas. Se demostraba con ello que el tiempo de llegada, y no la intensidad relativa, era la señal que el animal utilizaba para determinar la dirección de la fuente.

Es más, la habilidad del escorpión para discernir qué patas se estimulaban primero era notable. Las demoras de tiempo de uno a dos milisegundos producían por lo general la mejor simulación de una onda natural, como lo demostraba la velocidad y la precisión con las que el escorpión giraba a la izquierda o a la derecha; un milisegundo es aproximadamente el tiempo que una onda de superficie tardaría en atravesar los cinco centímetros de diámetro del campo sensorial de un escorpión. Sin embargo, demoras más pequeñas, del orden de los 0,2 milisegundos, también desencadenaban respuestas de giro adecuadas.

Sólo queda ya planteada la cuestión de cómo percibe el escorpión la distancia de su presa. Nuestras primeras observaciones de campo mostraban que juzga la distancia a la presa hasta unos 15 centímetros, y que a 10 centímetros o menos raramente falla. Por desgracia, dado que el animal es reacio a cazar en el laboratorio, el mecanismo que emplea para fijar la distancia no es de fácil estudio, y constituye aún objeto de especulación. Sin embargo, al igual que la determinación de la dirección del origen, la evaluación de la distancia debe contemplar la detección de pequeñas diferencias en el tiempo o amplitud de estimulación de los diferentes receptores.

También es probable que la información procedente de las ondas de compresión, que no parece contribuir a la respuesta de orientación, sea un factor importante en la capacidad del escorpión para percibir la distancia. Una posibilidad es que el animal cronometre la demora entre la estimulación de los pelos tarsales mediante las ondas de compresión y la estimulación del sensilio de hendidura por parte de las ondas de Rayleigh, más lentas. La demora sería proporcional a la distancia al origen. Una segunda posibilidad implicaría la sensibilidad a la atenuación de tales señales. La amplitud de las ondas mecánicas decae rápidamente al tiempo que éstas se expanden a través de la arena; ello es aún más acusado en las ondas internas de compresión, porque su energía se disipa sobre un frente de onda esférico en lugar del frente circular característico de las ondas superficiales. Cuando un escorpión se halle cerca de una fuente de ondas, percibirá una diferencia mucho mayor en la intensidad del estímulo entre sus patas más cercanas y las más alejadas de la misma que cuando se halle lejos de la fuente.





8. EL ESCORPION PERCIBE LA DIRECCION del blanco según las patas que estimule primero el paso de una onda de Rayleigh. En el experimento que se ilustra se puso el escorpión a horcajadas sobre la abertura de una plataforma dividida; tal disposición permite estimular independientemente los miembros derechos e izquierdos. Un osciloscopio registra los trenes de estímulos aplicados a cada lado de la plataforma. El escorpión siempre gira en la dirección de las patas que se estimulan primero, aun cuando las otras reciban un impulso más intenso. Se prueba así que la demora entre la estimulación de patas opuestas, y no la intensidad relativa de la estimulación, codifica la información utilizada para determinar la dirección del origen de la perturbación. Los experimentos de la plataforma muestran también que los escorpiones pueden detectar demoras de tiempo muy pequeñas, de hasta 0,2 milisegundos, pero responden mejor a las demoras que van de uno a dos milisegundos (y que corresponden, aproximadamente, al tiempo que le toma a una onda de Rayleigh atravesar la distancia que media entre las patas del animal).

Recapitulando lo expuesto, parece una notable contradicción al sentido común que un animal, en particular uno que vive sobre arena, fíe tan acusadamente en información transmitida a través del suelo. Y, sin embargo, la utilización que el escorpión de la arena hace de las ondas que se propagan a través de un sólido probablemente no sea un caso único. Otros sustratos naturales (una hoja, por ejemplo, o una manzana o el tronco de un árbol) pueden, en virtud de su forma y sus propiedades físicas peculiares, transmitir información de importancia a distancias cortas, apropiadas al pequeño mundo de los animales que viven sobre ellos. En realidad, el escorpión de la arena es un ejemplo más de una creciente relación de organismos (entre otros las arañas de tapadera, la hormiga león y los cangrejos violinistas) que se orientan hacia el origen del movimiento en un sustrato sólido, “oyendo”, al tiempo que andando, con sus patas.

El pozo más profundo del mundo

Alcanzados los 12.000 metros, el pozo de prospección de Kola, en el Artico soviético, ha revelado el origen de una discontinuidad sísmica. Se han ensayado en él modernas técnicas de prospección de la corteza

Ye. A. Kozlovsky

Desde 1970, en el desnudo roquedo de la península de Kola, 250 kilómetros al norte del Círculo Artico, en la región de Murmansk, Unión Soviética, una torre de perforación tan alta como un edificio de 27 plantas viene sondeando en el escudo continental báltico. El trépano, excavando a través de roca cristalina en más de la mitad de su trayecto, ha hundido la base del pozo más allá de los 12.000 metros. El "super pozo" de Kola es el más profundo del mundo. Supera en mucho las profundidades de 1500 a 7000 metros de los pozos que suelen perforarse para prospección o extracción de petróleo, carbón, hierro, metales no férreos, diamantes y otros recursos de la Tierra.

El mayor tesoro ambicionado por el pozo de Kola es el conocimiento de la estructura profunda de la corteza continental y de las fuerzas que la han conformado a lo largo de los 4000 millones de años de su historia geológica. La información de que se dispone hoy procede en gran parte de la observación de muestras de la corteza, de aproximadamente 15.000 metros sobre un espesor promedio de 30.000 metros, que afloran acá y allá en la superficie. La velocidad de las ondas sísmicas, creciente con la profundidad pero variable en función de la constitución de la roca, y los datos de los instrumentos transportados por aeronaves y satélites, que registran los campos gravitatorio y electromagnético de la Tierra, revelan gran cantidad de información acerca de lo que se esconde en su interior. Sin embargo, todos esos datos no pueden remplazar la observación directa de lo que hay en las entrañas de la Tierra y de lo que allí ocurre ahora.

El pozo de Kola ha recorrido 1400 millones de años de la historia de la Tierra, atravesando la era Proterozoica y penetrando en las rocas arcaicas hasta los 2500 o 2700 millones de años de antigüedad. Ha revelado media docena de ciclos de formación de corteza, en los que brotó roca ígnea nueva del manto fundido subyacente, se destruyó esa roca por meteorización y por la acción del hielo, se dispersaron y redistribuyeron sus restos en los estratos sedimentarios y nuevamente se convirtieron en roca cristalina por el metamorfismo inducido por el calor y la presión de la siguiente intrusión de rocas ígneas. Las muestras de roca, llevadas a la superficie con una dificultad creciente en función de su profundidad, establecen un modelo térmico general de evolución de la corteza para el período en el que las principales características de los escudos continentales de la Tierra estaban ya configuradas. Tal registro permite determinar la composición de la primitiva corteza de Kola: era granodiorita, una roca ígnea algo más pobre en cuarzo que el granito.

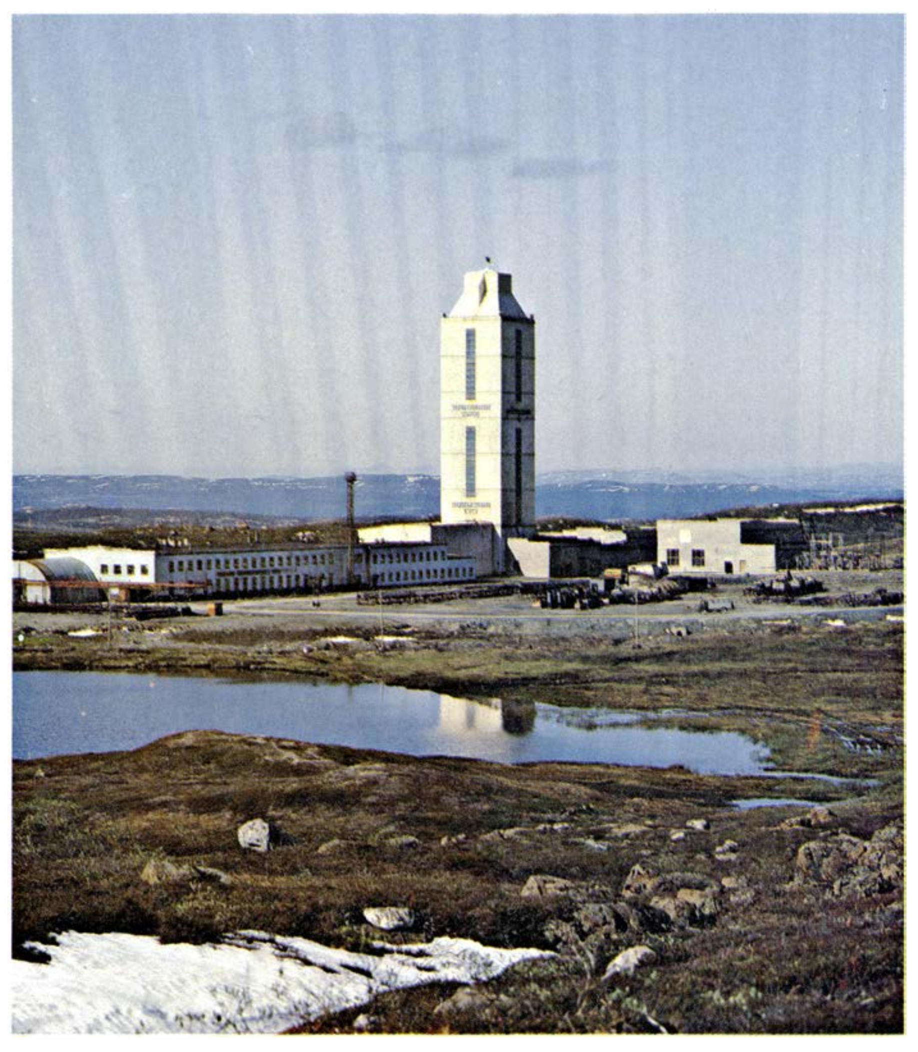
Un objetivo fundamental del sondeo de Kola era superar la capa crustal superior de granito y penetrar en el basamento rocoso inferior de composición basáltica. Los basaltos se encuentran con escasa frecuencia en superficie, y el supuesto basamento basáltico no aparece por ninguna parte en el continente. El límite se considera marcado por un brusco aumento de la velocidad de las ondas sísmicas, observado en todo el mundo a profundidades correspondientes a la mitad del espesor de la corteza. En la península de Kola el salto de la velocidad de las ondas se produce a los 9000 metros. El pozo abierto en ella ha sido el primero en traspasar este límite; sin embargo, no se encontraron basaltos soportantes.

Por el contrario, ha alcanzado la base de una zona anómala de roca metamórfica alterada, que empezó a atravesar a los 4500 metros. Mientras se abría camino por esa zona, el pozo encontró, sorprendentemente, numerosas corrientes de agua caliente, fuertemente mineralizada. Ese agua ("agua de cristalización") procede de los minerales que componen la roca cristalina; se cede en las disociaciones y reasociaciones que se desarrollan en el proceso de metamorfismo. El agua metamórfica desempeña un papel fundamental en la génesis de depósitos de minerales. Ordinariamente encuentra alguna salida de formación metamórfica y deposita su carga mineral en porciones superiores de la corteza. En Kola el agua ha quedado atrapada en el lugar de su liberación por capas suprayacentes de rocas ígneas impermeables de dos kilómetros de espesor. Para introducir el agua en el interior de la roca habría que ejercer una presión sólo alcanzable en mayores profundidades de la corteza o en el manto superior. Puesto que la resistencia a la tensión de la roca es una fracción de esa presión hidráulica, su deshidratación ha ido acompañada de microfracturación. Tal fenómeno de disgregación hidráulica de la roca metamórfica, nunca antes observado, quizá tenga gran importancia en la estructura de los continentes.

Por los flujos de agua mineralizada encontrados en la zona de disgregación y en delgadas formaciones inferiores claramente definidas, y por la evidencia de depósitos minerales que se han hallado en otros niveles, el pozo de Kola demuestra que el hombre apenas ha arañado la superficie en la búsqueda de minerales. Inmensos recursos esperan en las profundidades los avances de la tecnología.



1. CABEZA DEL POZO DE KOLA flanqueada por elementos de varillaje de aleación de aluminio. La fotografía se hizo dentro de la torre de perforación que se levanta por encima de la cabeza del pozo y sostiene la sarta. La estructura alcanza 86 metros de altura y una capacidad de 400 toneladas métricas. El motor de la perforación, situado al fondo del pozo, es una turbina impulsada por el flujo de lodo de perforación, bombeado desde la superficie.



2. EDIFICIO DE LA TORRE DE PERFORACION, de 30 pisos, situado en la tundra de Kola, en la región de Murmansk, 250 kilómetros al norte del Círculo Artico. La construcción aísla la cabeza de pozo del gélido ambiente exterior, lo que permite perforar todo el año. (Fotografía de A. A. Chumichev.)



3. LOCALIZACION DE LAS PERFORACIONES seleccionadas para un amplio estudio de la corteza. Con la tecnología desarrollada en la perforación del pozo de 12.000 metros de Kola y del pozo de Saatly, en el mar Caspio, donde se han alcanzado los 8500 metros de profundidad, se perforarán otros tres pozos hasta profundidades de más de 7000 metros en las localidades rotuladas. Paralelamente, sondeos de menor profundidad se realizarán en otras localidades (*puntos no rotulados*). Los pozos se localizan en la intersección de perfiles sísmicos elaborados recientemente y su perforación aumentará el conocimiento de la estructura de la corteza, así como de la génesis de yacimientos minerales y de hidrocarburos.

El avance del pozo también ha liberado gas en todos los niveles. Se ha identificado helio, hidrógeno, nitrógeno, metano y otros hidrocarburos, así como anhídrido carbónico. Sin duda, los elementos ligeros que componen esos gases se liberaron de la estructura cristalina de la roca por el mismo proceso metamórfico que el agua. Sin embargo, la composición isotópica del carbono sugiere dos fuentes de dióxido de carbono. La presencia de microorganismos fósiles en las rocas proterozoicas, de cientos de millones de años, indica que la segunda fuente de carbono es de origen biológico.

La perforación del pozo de Kola inaugura un programa a largo plazo de perforaciones sistemáticas de la estructura profunda de la corteza terrestre en la Unión Soviética, que se prolongará el próximo siglo. Bajo los auspicios del Consejo Interdepartamental para el Estudio del Interior de la Tierra y Perforaciones Superprofundas, geólogos e ingenieros de minas emprendieron en 1962 el desarrollo de técnicas para la perforación y estudio de sondeos profundos. En 1970 comenzaron las perforaciones en Kola y en Saatly, en el campo de petróleo y gas de Baku, en el mar Caspio, donde el sondeo ha alcanzado los 8500 metros. Un estudio preliminar de la sismicidad profunda del territorio soviético ha sido de gran ayuda para determinar los emplazamientos de pozos profundos y superprofundos de próxima perforación.

Un mayor conocimiento de la estructura profunda de la corteza terrestre conducirá a la elaboración de métodos para predecir la existencia, y para la prospección, de depósitos minerales y de campos de gas y petróleo a profundidades mucho mayores que las que hoy en día se explotan. Como el sondeo de Kola ha demostrado, pueden existir recursos minerales a gran profundidad. Por esa razón, el desarrollo de la tecnología que permita penetrar en el interior de la Tierra hasta profundidades de 10.000 a 15.000 metros es un objetivo esencial de la iniciativa investigadora.

A escala global, la corteza terrestre es bastante delgada: no más de 35 kilómetros en un radio de 6000 kilómetros. Las sísmicas y otras pruebas indirectas parecen confirmar la hipótesis, avanzada en 1926 por el geofísico británico Harold Jeffreys, según la cual la corteza continental se compone de tres capas: sedimentaria, granítica y basáltica. La correlación de la densidad de muestras de roca realizadas en el laboratorio con la velocidad de las ondas

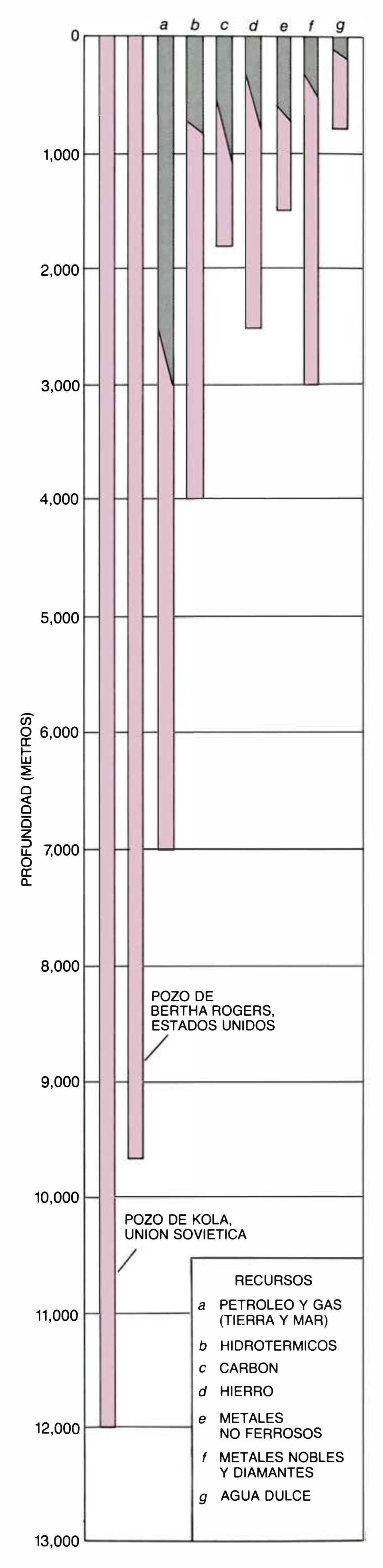
sísmicas observadas en el terreno da una densidad de 1,8 a 2,5 gramos por centímetro cúbico y una velocidad próxima a los cinco kilómetros por segundo para las rocas sedimentarias. Las densidades y velocidades crecen hasta 2,5 y 2,75 gramos por centímetro cúbico y entre cinco y seis kilómetros por segundo para rocas graníticas. A partir de la denominada discontinuidad de Conrad, la velocidad de las ondas sísmicas alcanza entre seis y siete kilómetros por segundo; lo que se ha interpretado como indicador de la transición hacia la capa basáltica, de una densidad de 2,75 a tres gramos por centímetro cúbico. La capa granítica, compuesta por elementos ligeros, oxígeno, silicio y aluminio, se creó durante la era Arcaica, presentándose ampliamente desarrollada en la superficie de los continentes. Mientras que la corteza continental puede alcanzar espesores de 70 a 75 kilómetros bajo las cadenas montañosas, la corteza oceánica solamente tiene de cinco a diez kilómetros; según la opinión general, esta última es una capa basáltica cubierta por depósitos de sedimentos.

Bajo la corteza continental y la oceánica se encuentra la discontinuidad de la velocidad de las ondas sísmicas llamada de Mohorovičić, que se interpreta como techo del manto. La velocidad llega bruscamente a 7,8 kilómetros por segundo y aumenta a saltos hasta 13,6 kilómetros por segundo al profundizar en el manto superior (de 35 a 300 kilómetros), medio (de 300 a 950 kilómetros) e inferior (de 950 a 2900 kilómetros). La densidad de las rocas del manto alcanza, en justa correspondencia, de 3,3 a 5,9 gramos por centímetro cúbico. Tanto por la observación directa de rocas volcánicas como por las observaciones indirectas aportadas por los meteoritos y los datos geofísicos y astronómicos, se cree que el manto lo forman silicatos de magnesio y de hierro hasta los 1100 kilómetros de profundidad. A niveles inferiores predominan sulfuros y óxidos de hierro, cobre, cinc, plomo, mercurio, antimonio y bismuto, así como selenio, teluro, oro, plata y otros metales pesados. La temperatura del manto superior alcanza, aparentemente, de 1000 a 1500 grados Celsius y la presión a esas profundidades llega a las 100.000 atmósferas.

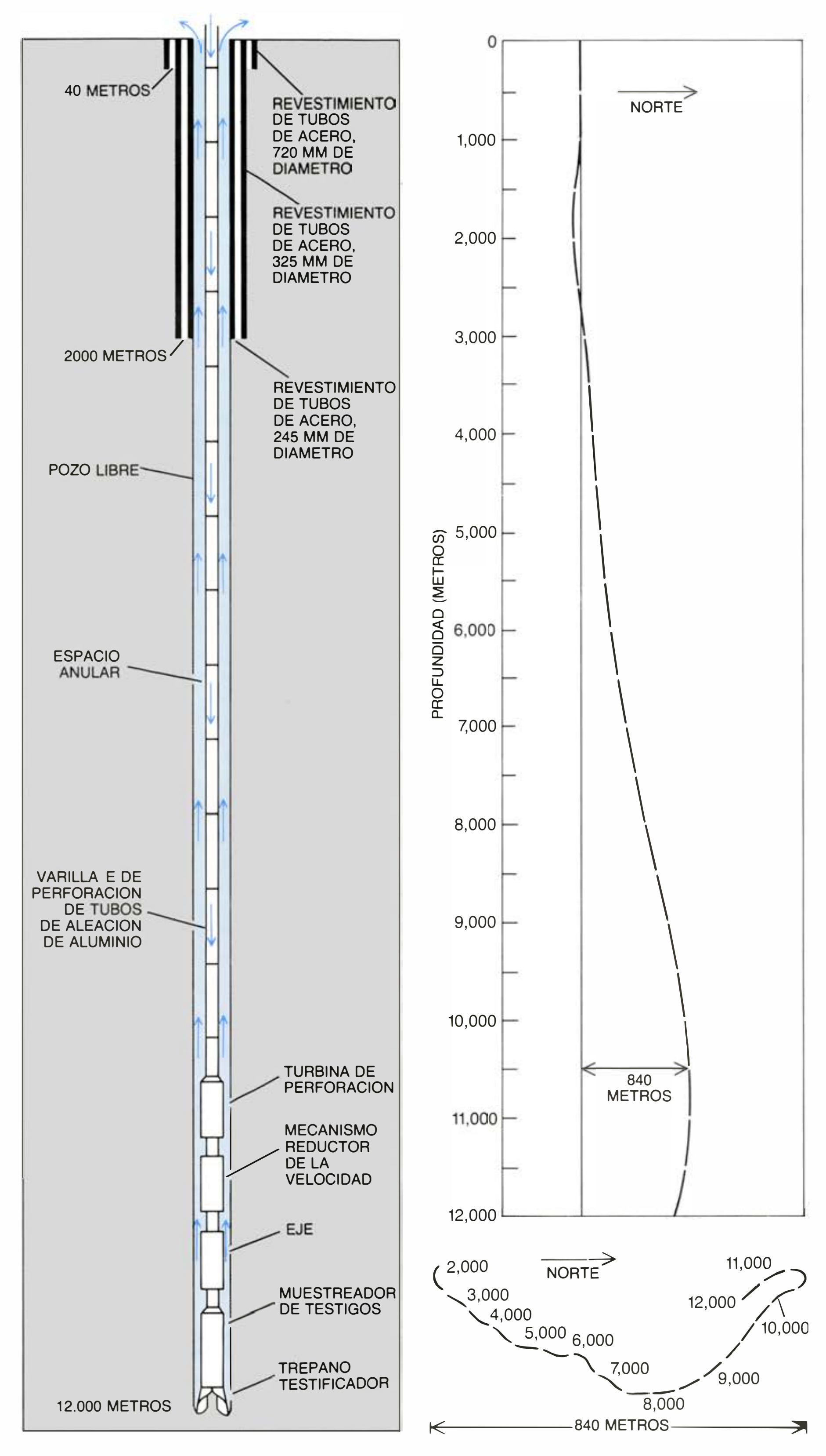
Para comprobar y mejorar la imagen de la corteza terrestre confeccionada a partir de observaciones indirectas, los geológos han ansiado la perforación de pozos que rebasen las discontinuidades de Conrad y de Mohorovičić. Se escogió la península de Kola para la presente empresa porque el escudo báltico es representativo de las antiguas placas continentales graníticas de la India, América del Norte, del sur de Africa, del oeste de Australia, Antártida y Groenlandia. El emplazamiento del pozo está situado en la región de minas de cobre y niquel de Pachenga; se esperaba que el pozo arrojase luz sobre la génesis de estas mineralizaciones. La región, que estuvo expuesta a la acción del hielo y a la meteorización durante cientos de miles de años, ha perdido entre 5000 y 15.000 metros de la parte superior de la capa granítica por erosión. Por consiguiente, los 12.000 metros de corte geológico del pozo de Kola corresponden a una capa continental "promedio" a las profundidades comprendidas entre 8000 y 20.000 metros por debajo de la superficie.

La perforación del pozo de Kola ha introducido significativos avances en las técnicas de perforación. Por debajo de los 10.000 metros la tradicional perforación por rotación, que hace girar el trépano en el fondo del pozo por rotación de la sarta completa, encuentra dificultades insalvables. Las 800 o 900 toneladas métricas de peso del varillaje de tubo de acero generan una enorme tensión en la superficie y aumentan las fuerzas que se oponen a la rotación de la sarta. En el pozo de Kola, una turbina de fondo de pozo, impulsada por el flujo de lodos de perforación, hace girar el trépano. La rotación del varillaje se elimina totalmente, o se reduce a unas cuantas vueltas por minuto, requeridas para favorecer el giro del trépano por la turbina.

En un sondeo ordinario, el lodo de perforación se bombea abajo por el interior del varillaje para enfriar el trépano y arrastrar los detritos; retorna a la superficie por el hueco que queda entre el varillaje y la pared del pozo, procedimiento que ayuda a mantener la integridad de la pared. En el pozo de Kola el lodo se impulsa hacia la turbina a una presión de 250 atmósferas. Bajo la turbina, en la sarta, un mecanismo reductor rebaja la velocidad de rotación del trépano en tres o cuatro veces la de un sondeo convencional, hasta un óptimo de 80 a 150 revoluciones por minuto,



4. POZOS Y MINAS alcanzan profundidades diversas según los recursos que se extraen de ellos. Las barras del gráfico comparan las profundidades media (*gris*) y máxima (*color*) de cada tipo de sondeo con la profundidad del pozo de Kola y el pozo de Bertha Rogers, Oklahoma. Esta perforación, la segunda del mundo en profundidad, era un pozo de gas; la perforación se detuvo a 967 metros, cuando el trépano se topó con azufre fundido.



5. ESQUEMA DEL POZO donde se muestra el progresivo estrechamiento del agujero. Hasta una profundidad de 40 metros, el agujero se perforó con un trépano de aproximadamente un metro de ancho y se revistió con tubo de 720 milímetros de diámetro. La perforación prosiguió con un trépano de 214 milímetros. Los primeros 2000 metros del agujero se ensancharon y revistieron luego con tubo de 325 milímetros para el control de desplomes. De ahí en adelante el agujero va sin entubar, pero lo sostiene la presión del lodo de perforación.

6. TRAYECTORIA DE LA PERFORACION, cuya desviación en relación a la cabeza del pozo se ha dibujado de perfil (*arriba*) y en planta (*abajo*). Se aparta de la vertical un máximo de 840 metros a la profundidad de 10.500 metros. Es inevitable cierta deriva de la perforación, que incrementa la fricción cuando la sarta se introduce en la perforación o se extrae para la recogida de muestras del testigo o para sustituir los trépanos desgastados. Para medir la inclinación del pozo y guiar el trépano se utilizaron giroscopios y sacudidas verticales.

incrementándose de manera correspondiente su momento de rotación. Una red hidráulica de realimentación del sistema de bombeo, que transmite a los lodos de perforación oleadas de presión a 1500 metros por segundo, controla la rotación de la turbina y de la sarta y, con ello, la velocidad y momento de rotación del trépano. Con filtros de ruido de diseño original se asegura la fiabilidad del control a una profundidad de 12 kilómetros.

El varillaje, de una aleación de aluminio de gran resistencia, pesa solamente de 400 a 500 toneladas. Constituye ello una gran ventaja, pues la sustitución de los trépanos desgastados o la extracción de testigos requiere que la operación de recogida de la totalidad de la sarta y su nueva bajada a la base de perforación se realicen cientos de veces. Los 11.000 metros del sondeo suponen que la longitud total de tubo que ha pasado a través de la boca del pozo en el transcurso de esas operaciones rutinarias excede los 25 millones de metros. A parte de la reducción de la carga en la torre, la ligereza del varillaje hace que el desgaste, producido por fricción en todo su trayecto, sea menor, tanto en el propio varillaje como en el revestimiento y en la pared del pozo a lo largo de todo el recorrido. Este desgaste puede ser considerable, pues las perforaciones nunca son totalmente verticales. El pozo de Kola tiene una desviación promedio de cinco grados respecto de la vertical, con un máximo de 17 entre los 10.000 y 10.500 metros; en ese punto el trépano estaba 840 metros desplazado lateralmente de la vertical del pozo [*véase la figura 6*].

El proyecto del pozo de Kola tuvo que reaccionar ante los imprevisibles cambios de las condiciones a medida que el trépano se abría camino hacia abajo. Así, mientras que se revistieron los dos primeros kilómetros del pozo [*véase la figura 5*] se hizo evidente que a profundidades mayores serían necesarias una mayor libertad de movimiento y de toma de decisiones. Se adoptó, en consecuencia, la estrategia de "perforación a pozo libre". Por debajo de los 2000 metros la totalidad del sondeo se ha realizado sin revestimiento.

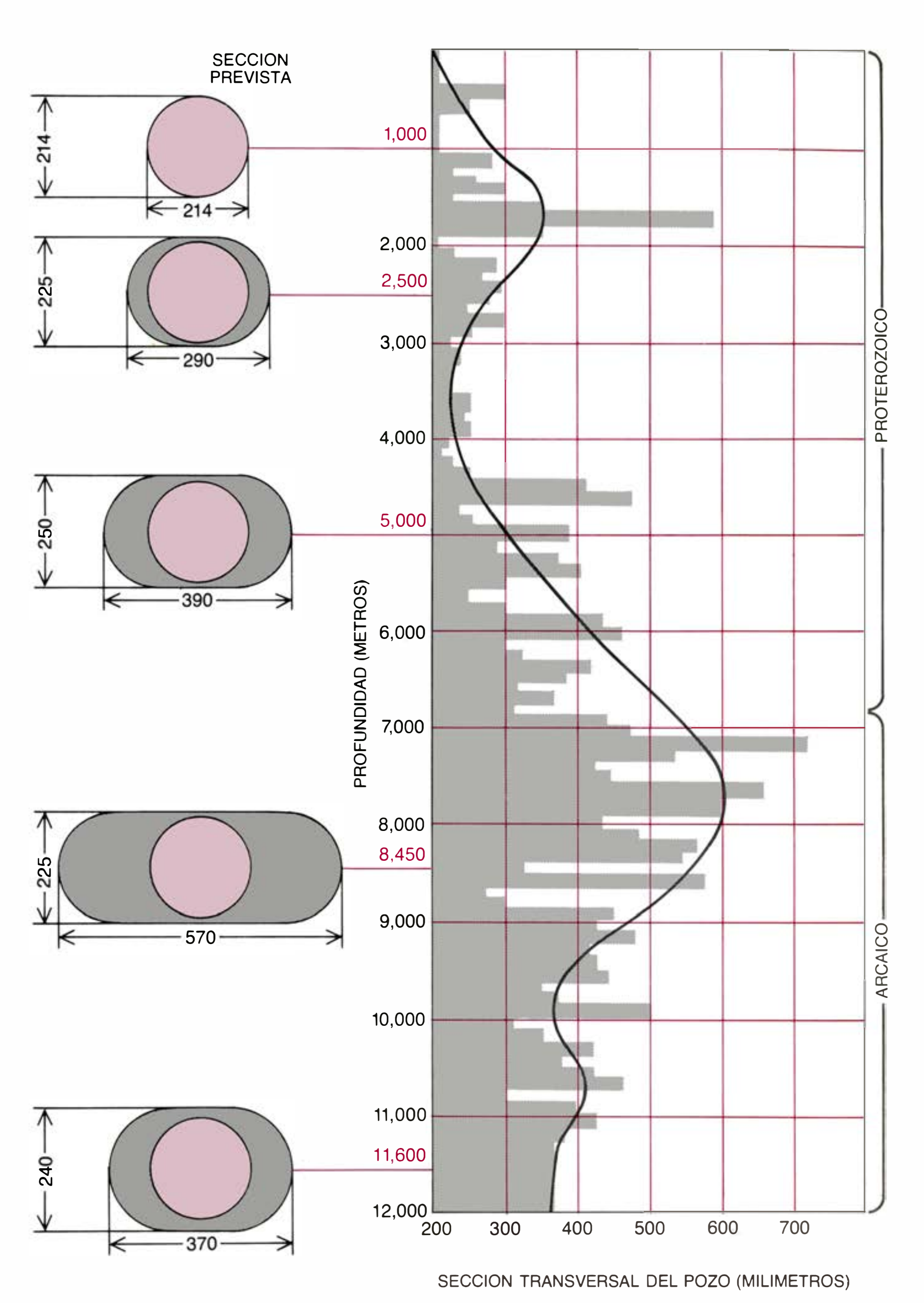
Todo pedazo de roca extraído de la profundidad de la Tierra tiene su valor. Conforme el pozo de Kola ganaba profundidad, se hacía más difícil extraer testigos a la superficie. Ordinariamente, un testigo cilíndrico de 60 a 80 milímetros de diámetro penetra en el tubo del trépano mientras la herramienta desgasta un anillo de roca del

fondo; el testigo permanece en el cilindro hasta que el varillaje se iza a la superficie. A profundidad suficiente, no obstante, la roca "estalla", por liberación de las fuerzas internas cuando la herramienta suprime la compresión de los estratos rocosos suprayacentes que las generan. De utilizarse un equipo de muestreo ordinario a tales profundidades, la entrada al cilindro portatestigos quedaría bloqueada por fragmentos del testigo; del 90 al 95 por ciento del testigo pasaría, molido, al lodo de perforación. En una nueva herramienta sacatestigos, se desvía un poco del flujo al interior del cilindro portatestigos, se recogen fragmentos del testigo reventado y se introducen en una cámara especial; la entrada queda libre para nuevas muestras.

La tecnología ahora experimentada en el pozo de Kola abre la posibilidad de perforar hasta profundidades que oscilen entre los 15 y 17 kilómetros. Sin embargo, deben predecirse nuevos problemas. Ordinariamente, las aleaciones de aluminio pierden su resistencia a temperaturas comprendidas entre los 110 y 150 grados Celsius. Hemos logrado desarrollar aleaciones que soportan temperaturas de entre 230 y 260 grados. La metalurgia de polvo promete aleaciones de aluminio estables a temperaturas comprendidas entre los 270 y 300 grados, previsibles conforme el pozo vaya profundizando. Se pueden obtener tubos de perforación de aleación de titanio que resistan las temperaturas de 400 grados a las que habrá que enfrentarse a profundidades aún mayores.

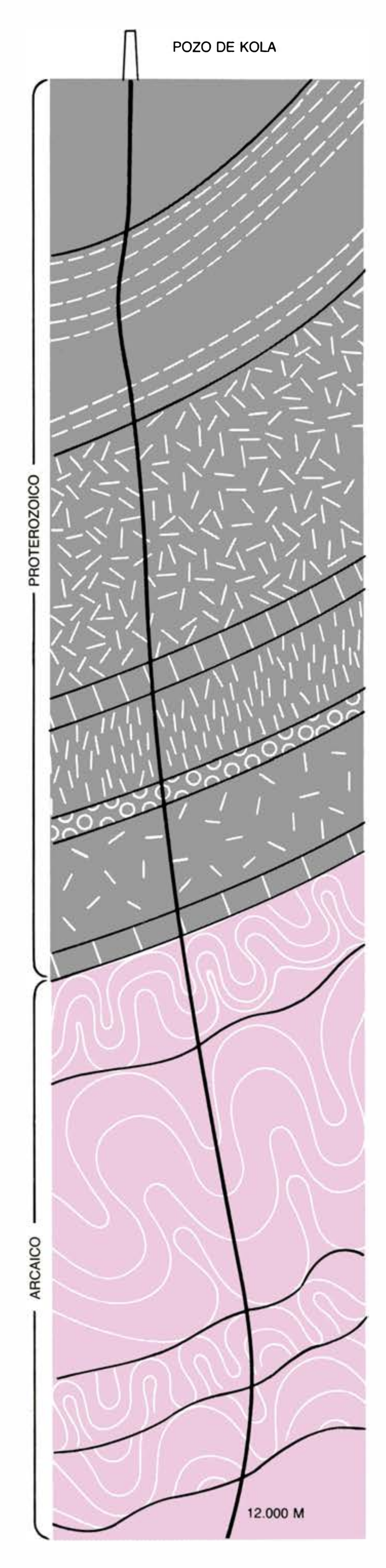
Junto con las altas temperaturas, la tecnología para perforaciones profundas debe prever presiones que rondan las 3000 atmósferas, efectos de la corrosión química de las aguas confinadas, altamente mineralizadas, pérdidas de estabilidad de las masas de rocas que rodean la perforación y desviación del agujero de la vertical. La recuperación de muestras del testigo a la superficie se hace cada vez más difícil. Para solucionar ese inconveniente habrá que diseñar un método de obtención y transporte de las muestras de roca en envases cerrados, que mantengan las condiciones reinantes en el fondo del agujero, incluida la saturación de la roca en gases y agua. Se está desarrollando en el laboratorio una cámara de presión para simular las condiciones reinantes entre los 15 y 20 kilómetros, es decir, temperaturas de 300 a 400 grados Celsius y presiones de 2000 a 3000 atmósferas.

La historia de la Tierra a la que ha accedido el pozo de Kola tiene que interpretarse, obviamente, de abajo arriba. En el complejo Arcaico, entre 12.000 y 6842 metros, el primer piso muestra la acumulación de gruesos niveles sedimentarios procedentes de la meteorización de los primeros granitos, viéndose interrumpida la alteración por flujos intrusivos de granito plutónico. Prueba que esos granitos son ricos en hierro y titanio la concentración de mineralizaciones de magnetita e ilmenita, que alcanzan del 40 al 50 por ciento de la roca a 8711 metros. En el segundo piso las rocas sufrieron plegamiento, metamorfismo y ultrametamorfismo a temperaturas de 750 a 900 grados Celsius y presiones de 5000 a 11.000 atmósferas.



7. SECCION TRANSVERSAL DE LA PERFORACION. Varía con la profundidad, si bien el diámetro del trépano permanece constante. El gráfico de barras (*derecha*) muestra las medidas de calibre según su diámetro máximo a cada profundidad; la curva esquematiza la tendencia. La forma generalmente elíptica del agujero constituye la resultante de fuerzas compresivas horizontales desiguales de la roca; el eje menor del agujero corresponde a la dirección de mayor fuerza. La roca se libera y estalla según el eje de menor fuerza, ensanchando el agujero y produciendo fragmentos que arrastraba a la superficie el lodo de perforación. La magnitud del efecto suele variar con los cambios de presión y de naturaleza de la roca.

Este tipo de reconstrucción de la historia por parte de los geólogos se apoya en que las rocas registran con gran detalle la temperatura y la presión. A partir del mismo material inicial proporcionado por el manto, las



8. ESTRATOS GEOLOGICOS atravesados por la perforación; abarcan 1400 millones de años de historia de la Tierra. Las rocas de profundidades inferiores a 6800 metros (*gris*) pertenecen a la era Proterozoica, que comenzó hace 2400 millones de años. Los niveles graníticos más profundos (*color*) se emplazaron mucho antes, hace unos 2700 millones de años, durante la era Arcaica, primera del tiempo geológico. Se esperaba que el pozo pasase de rocas graníticas a un nivel inferior basáltico a los 9000 metros de profundidad, donde se sitúa un brusco cambio de velocidad de las ondas sísmicas. Por el contrario, se constató que el cambio de velocidad marcaba la base de una zona de rocas fracturadas por la presión del agua expulsada por la cristalización de minerales durante el metamorfismo.

rocas metamórficas desarrollan una variedad de características distintivas, "facies", que pueden determinar variaciones en la composición elemental, dependientes de la presión y temperatura de su formación. En general el metamorfismo produce rocas más densas con bajo contenido en agua a partir de rocas más hidratadas. Los elementos no incorporados en las nuevas fases cristalinas se disuelven en las aguas recién liberadas.

Las dataciones por radioisótopos sitúan hace entre 2700 y 2800 millones de años la culminación del metamorfismo arcaico en la península de Kola. Le siguió una intensa erosión por agua y acumulación de sedimentos procedentes de la meteorización de la corteza en depresiones aisladas. En algunas regiones del mundo, especialmente en Sudáfrica, inmensos depósitos de conglomerados con mineralizaciones metálicas están asociados a esos depósitos sedimentarios.

El complejo Proterozoico, desde los 6842 metros hasta la superficie, comenzó a edificarse sobre el basamento arcaico hace 1100 millones de años. Durante ese período, las rocas registran cuatro fases principales de formación de corteza continental. En la primera fase se depositó material volcanosedimentario sobre el suelo arcaico. Los estratos detríticos muestran cambios bruscos de espesor, señal de que los depositaron corrientes de agua en valles antiguos. Un primer ciclo de plutonismo produjo la intrusión de rocas graníticas, desprovistas de elementos metálicos, que se superponen a las rocas anteriormente formadas y las someten a la alteración por metamorfismo de baja temperatura. En un segundo ciclo, el manto aportó rocas ricas en elementos metálicos. Tales intrusiones portadoras de mineralizaciones generaron los depósitos de sulfuros de cobre y niquel que afloran en la región de Pechenga. El pozo de Kola encuentra tales depósitos, a intervalos, hasta la profundidad de 1500 a 1800 metros. La cuarta fase de la era Proterozoica ocasionó el episodio anómalo de metamorfismo "confinado" que produjo la disgregación hidráulica de las rocas metamórficas observada por primera vez en el pozo de Kola en toda la zona de 4500 metros de espesor que atraviesa el basamento arcaico.

Muestras de testigo prueban que el contenido en agua de constitución permanece constante, en un 4 por ciento de la roca, hasta los 4500 metros de la superficie. Allí, con bastante brusquedad, el contenido en agua de la roca decrece al 2,1 por ciento. En ese punto comienza la zona de disgregación; la microfracturación de la roca incrementa la porosidad hasta tres o cuatro veces la observada en las rocas superiores y reduce correspondientemente la densidad de la roca de 3,1 a 2,9 gramos por centímetro cúbico. El agua liberada, atrapada en los intersticios de la roca fracturada, obligó al volumen total inicial de roca y agua a incrementarse en un 1,7 por ciento, según demuestran los cálculos. La enorme presión hidráulica así ejercida causó la microfracturación, que debió incrementar inicialmente la porosidad superando hasta 10 veces la de los estratos suprayacentes.

El límite inferior de esta zona, a unos 9000 metros, está marcado por un incremento de la velocidad de las ondas sísmicas. Ello demuestra, naturalmente, que no se trata de la supuesta discontinuidad de Conrad entre rocas graníticas y basálticas. El incremento de la velocidad de las ondas elásticas marca, simplemente, la base de la zona de disgregación, con la aparición de la roca de densidad normal y el cese de la afluencia de agua termal al pozo.

El valor de una observación directa del interior de la Tierra queda ampliamente demostrado por este descubrimiento. La disgregación hidráulica de las rocas metamórficas quizás explique la naturaleza geológica de los límites marcados por los cambios de velocidad de las ondas elásticas y reflexión de tales ondas observados en todo el mundo en la parte superior (a unos 15 o 20 kilómetros de profundidad) de la corteza terrestre. Por otra parte, este fenómeno puede alterar sustancialmente las vigentes hipótesis sobre la circulación de las aguas en la corteza continental y la naturaleza de la hidrosfera subterránea.

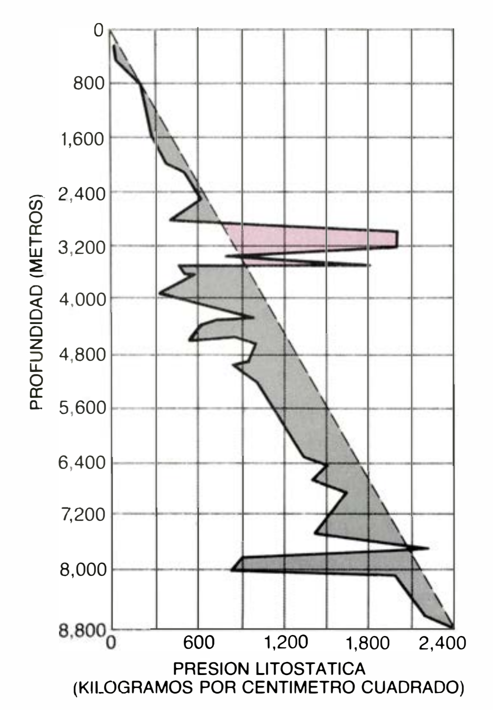
El alto contenido mineral de las aguas de fisuras y el flujo de gases del pozo prueban la existencia de procesos

acuoso-gaseosos en las rocas cristalinas hundidas a grandes profundidades. Ello aumenta las perspectivas del descubrimiento de nuevos depósitos minerales a esas profundidades. En la zona de desconsolidación del pozo de Kola, los fragmentos rocosos están cementados por sulfuros de cobre, níquel, hierro, cinc y cobalto. La temperatura de formación de tales sulfuros, relativamente baja, y la composición isotópica del azufre, parecida a la de los meteoritos, sugieren que los sulfuros se originaron en el manto. Cabe concluir, por tanto, que en una vasta franja vertical de la corteza continental imperan condiciones favorables para la formación de depósitos minerales hidrotermales.

Las mediciones directas de la temperatura imponen la revisión de la supuesta distribución y flujo del calor en el interior de la Tierra. Se creía que en una región tectónicamente estable como el escudo báltico la temperatura aumentaría lentamente con la profundidad, alcanzando 50 grados a 7000 metros y, tal vez, 100 grados a 10.000 metros. En realidad, el gradiente de temperatura medido se ajusta al incremento previsto de un grado cada 100 metros sólo hasta los 3000 metros. A partir de ahí la temperatura comienza una elevación de 2,5 grados cada 100 metros. A 10.000 metros ha alcanzado 180 grados. Cientos de metros cúbicos de lodo de perforación frío bombeados al pozo regresan a la superficie a 45 grados. Puesto que la radiactividad de las rocas atravesadas por el pozo sólo aportaría una contribución insignificante a ese flujo calorífico, éste debe proceder del manto.

El éxito del pozo de Kola ha infundido nueva confianza en los proyectos para la sistemática perforación profunda y superprofunda de la corteza terrestre en los márgenes continentales de la Unión Soviética [*véase la figura 3*]. Para el emplazamiento de los pozos se han escogido los puntos de intersección de una red de perfiles sísmicos, tras considerar las aportaciones de un extenso programa de sondeos sísmicos profundos llevado a cabo en la pasada década.

La perforación de los pozos ayudará, a su vez, a mejorar la interpretación de los datos sísmicos. La interpretación directa sobre las muestras del testigo y circunstancias de los pozos establecerá una correlación segura entre los límites geodinámicos de la corteza terrestre y el manto superior y los límites y contactos estructurales y de composición observados. Esta labor ayudará también a mejorar la resolución y precisión de los registros sísmicos, incrementando con ello la cantidad de información que rinden las observaciones indirectas de la geofísica. Las anomalías en la propagación y velocidad de las ondas sísmicas no relacionadas con los datos estructurales de los pozos plantearán nuevas e importantes cuestiones de estudio.



9. PRESION LITOSTATICA, deducida de las mediciones de la velocidad de las ondas acústicas a través de la roca próxima al agujero. Se desvía a menudo del incremento lineal,en función de la profundidad,que cabe esperar de un material homogéneo (*línea a trazos*). La zona de presiones anómalamente altas, a una profundidad de 3200 metros, refleja la elevada densidad de estratos impermeables a esa profundidad. Las presiones desproporcionadamente bajas, desde cerca de los 4000 hasta 9000 metros, indican una zona de roca fracturada.

No va a cesar la perforación en los pozos de Kola y Saatly. Se convertirán en laboratorios para el estudio pormenorizado de la fisiología y anatomía de la corteza en esos lugares. Los tres siguientes pozos superprofundos (de más de 7000 metros) se practicarán en Muruntan, Anastasievsko-Troitskaya y aledaños del mar Caspio. Simultáneamente se procederá a la perforación de seis pozos profundos (de más de 4000 metros), tres de ellos en regiones de gas y petróleo y tres en regiones mineras. De este modo, además de resolver cuestiones fundamentales acerca de la estructura de la corteza continental, los perfiles sísmicos profundos, combinados con la observación directa en pozos profundos y superprofundos, valorarán los principales elementos geotectónicos de la Unión Soviética que, según se cree, guardan importantes recursos.

Rotación mental de los objetos

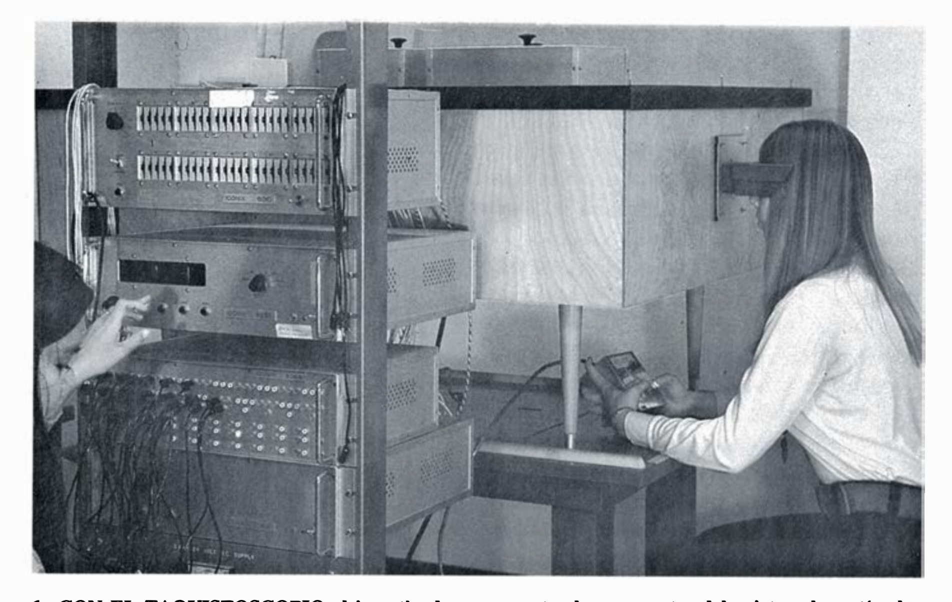
La rotación imaginada de un objeto espeja la rotación física. Este proceso mental puede estudiarse ya de un modo objetivo, aportando información cuantitativa sobre el pensamiento espacial

Lynn A. Cooper y Roger N. Shepard

¿En qué consiste el pensar? La introspección nos suministra respuestas provisionales. Parte del pensamiento es verbal: una especie de conversación callada con uno mismo. Otros procesos mentales parecen ser visuales: las imágenes acuden a la mente y allí son manipuladas sin palabras. A pesar de lo evidentes que resultan, los mecanismos del pensamiento vienen eludiendo desde hace mucho tiempo el análisis experimental y la cuantificación. ¿Cómo pueden medirse y estudiarse científicamente estos procesos tan subjetivos y aparentemente inaccesibles?

Hemos empezado a elaborar una respuesta a esta cuestión diseñando experimentos con idea de investigar la naturaleza de un aspecto del pensamiento: las operaciones espaciales imaginadas. Nuestros resultados confirman empíricamente lo que resulta subjetivamente evidente: que la mente modela procesos físicos, sometiéndolos a las limitaciones geométricas que reinan en el mundo exterior. Comprobaciones de tales operaciones mentales abundan en la vida cotidiana. Consideremos el problema siguiente: ¿Cómo introducir una mesa de juego por una puerta muy estrecha sin plegar sus patas? La mayoría de la gente opina que primero es necesario imaginar el proceso de dar la vuelta a la mesa colocando dos patas en el hueco de la puerta, y girarla después pasando primero dos patas y luego las otras dos.

Este tipo de imaginación espacial quizá no sea exclusivo de los seres humanos. Uno de los autores tuvo una vez ocasión de ver cómo un pastor alemán recuperaba una estaca que alguien había arrojado allende una valla a la que faltaba una tabla vertical. El perro se coló por el hueco, agarró la estaca con la boca y volvió corriendo en dirección al mismo hueco. Pero justo cuando la catástrofe parecía inminente el perro se detuvo en seco, giró la cabeza 90 grados y, con la estaca ya en posición vertical, atravesó la valla sin el menor rasguño. La operación que tuvo lugar en la mente del perro un momento antes de que girara la cabeza, cabe presumirlo, no fue verbal. ¿No fue acaso una rotación mental preparatoria de la estaca? ¿No fue tal vez una visualización espacial, más que la deducción verbal de lector avisado que adivina una catástrofe?

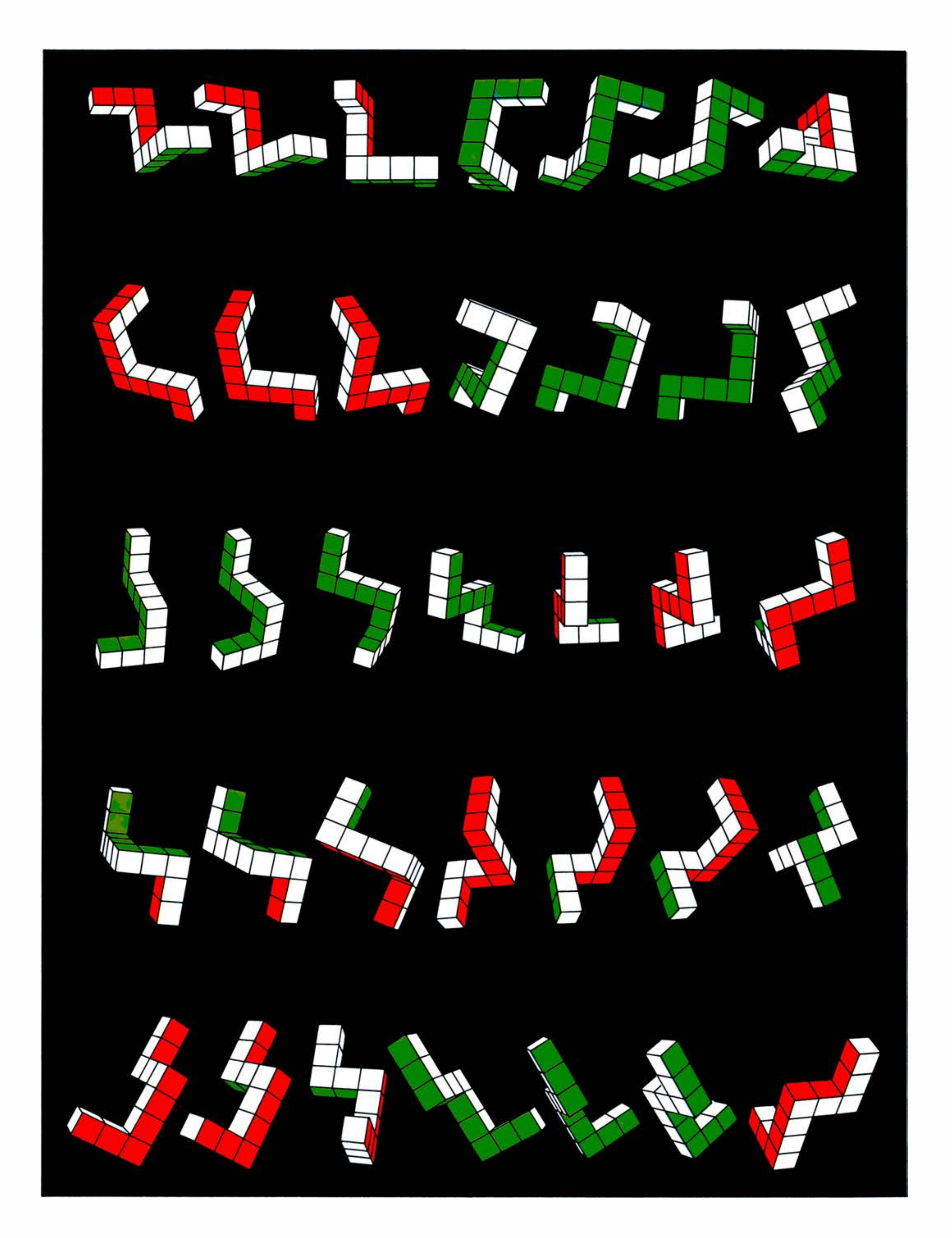


1. CON EL TAQUISTOSCOPIO el investigador cronometra las respuestas del sujeto a los estímulos visuales. Cuando el investigador aprieta un interruptor, se ilumina una pantalla que presenta las imágenes en cuestión, conectándose a su vez un reloj. La reacción del sujeto detiene el reloj, produciéndose entonces un registro preciso del intervalo temporal transcurrido entre el estímulo y la respuesta.

La capacidad para representar objetos o disposiciones de los mismos y sus transformaciones en el espacio resulta de obvio interés a la hora de enfrentarse a las realidades concretas de la vida cotidiana, haciendo posible la planificación de nuestros actos y la anticipación de los resultados. También puede desempeñar un papel muy importante en el pensamiento abstracto. Muchos científicos han confesado que sus logros más relevantes surgieron en un momento dado de relaciones y transformaciones espaciales imaginadas. Dos ejemplos muy conocidos son el de la imagen de la estructura de la molécula del benceno de Friedrich Kekulé y la visualización de James Watt del mecanismo de la máquina de vapor. Asímismo, Albert Einstein señaló que había llegado a la teoría de la relatividad tras "visualizar efectos, consecuencias y posibilidades" a través de "imágenes más o menos claras que pueden reproducirse y combinarse a voluntad".

No obstante, las evaluaciones subjetivas y cualitativas, incluso las efectuadas por científicos, no pueden sustituir al conocimiento objetivo y cuantitativo. Como dijo el ilustre psicofisiólogo K.S. Lashley en 1923, "la introspección puede realizar el esbozo provisional, pero luego debe dejar paso a la medida objetiva". Este tipo de investigación sistemática en el terreno de la imaginación espacial ha tardado mucho en llegar.

Hasta mediado el siglo xx hubo barreras teóricas que le impidieron el paso. Pero para entonces los conductistas norteamericanos, desde J.B. Wat-

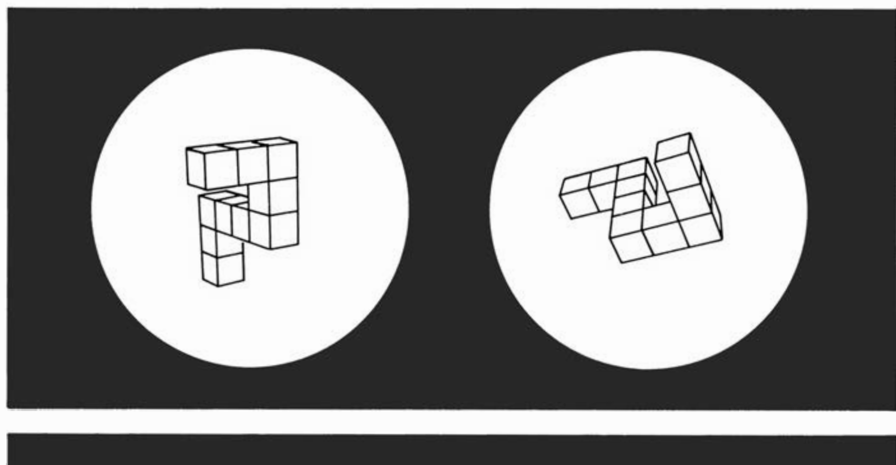


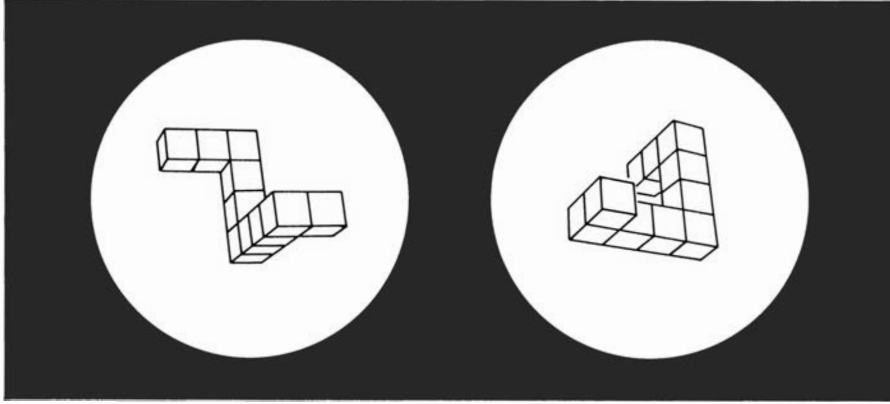
2. FORMAS TRIDIMENSIONALES rotando en el espacio generadas por dibujos en perspectiva producidos por un ordenador. Cuando se mostraban a los sujetos parejas de trazados lineales portadores de la misma forma en diferentes orientaciones, el tiempo que tardaban en reconocer que las figuras eran idénticas era proporcional a la diferencia angular que presentaban las orientaciones. El incremento lineal del tiempo con la diferencia en materia de orientación sugirió que los sujetos tenían que imaginar que la forma giraba siguiendo la orientación de la otra para comprobar si eran iguales.

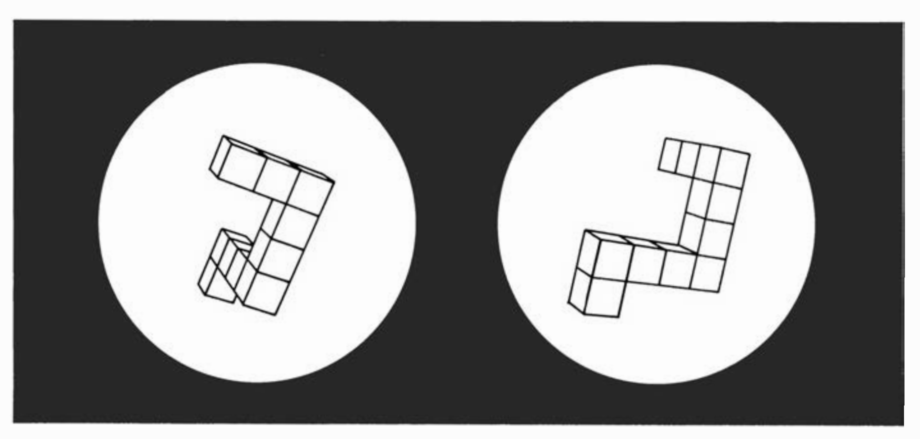
son hasta B.F. Skinner, habían luchado por separar a la psicología de sus orígenes introspectivos enclavados en la filosofía y establecerla sobre sus propios fundamentos empíricos. Insistían en que todos los términos teóricos correspondían a estímulos y respuestas especificables objetivamente y borraron del mapa referencias a fenómenos subjetivos: conciencia, mente, pensamiento e imaginación. Los estudios de laboratorio se centraron sobre acontecimientos registrables físicamente, tales como la presión ejercida por unas ratas sobre una barra o el picoteo de una palanca por parte de unas palomas; dejaron de lado los ocultos trabajos de la mente.

Durante la segunda mitad de este siglo, nuevos desarrollos empezaron a erosionar las barreras que los conductistas habían levantado en contra del estudio de las estructuras y los procesos de pensamiento. El lingüista Noam Chomsky elaboró un vigoroso argumento, según el cual la conducta lingüística tiene como guía unos esquemas innatos que habían sido ignorados por completo por parte de los conductistas. Y los psicólogos experimentales empezaron a producir demostraciones de que los procesos mentales podían inferirse e incluso cuantificarse a partir de patrones descubiertos en los datos registrados de forma objetiva.

Nuestros experimentos fueron diseñados para explorar ese tipo de proceso mental que ignoraron los conductistas coincidiendo precisamente con su demanda de datos objetivos y cuantitativos. La primera de nuestras investigaciones sobre el proceso de imaginación espacial, realizada en 1971 por uno de nosotros (Shepard) con Jacqueline Metzler, alumna graduada, cumplió con ambos criterios. Cada uno de los ensayos experimentales fue objetivo en el sentido de que la respuesta del sujeto a cada estímulo es objetivamente correcta o incorrecta, y cuantitativo porque la variable de interés era el tiempo que tardaba el sujeto en responder de un modo correcto.







3. IMAGENES EN PERSPECTIVA presentadas a pares a los sujetos del primer experimento. Diferían en tres aspectos. En el primer caso (*arriba*), los dibujos mostraban objetos idénticos en posiciones que diferían en su rotación dentro del plano de la figura. En el segundo (*centro*), las orientaciones dibujadas diferían en la profundidad de su rotación. Los sujetos determinaban la identidad de los objetos parejos de ambos tipos con la misma rapidez; en ambos casos imaginaban los objetos como cuerpos tridimensionales rotando en el espacio, no los comparaban. Un tercer tipo de dibujos utilizaba formas enantiomórficas.

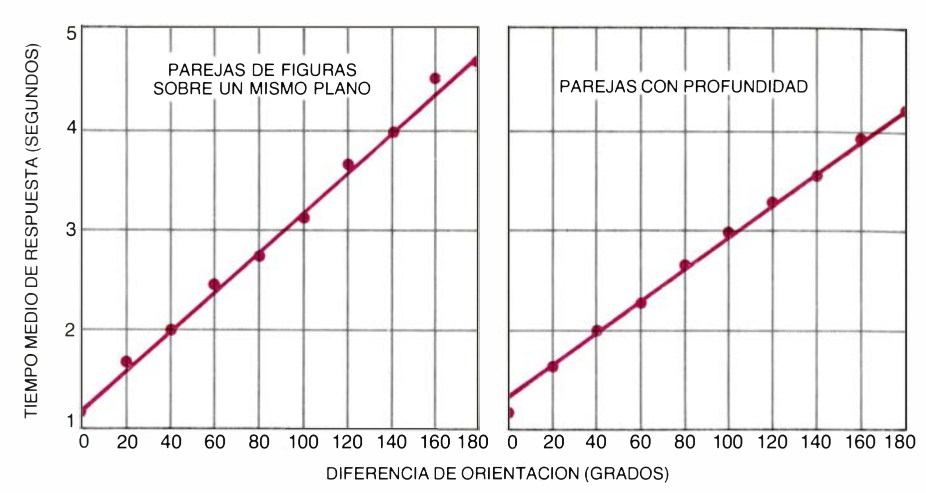
A los sujetos del experimento se les presentaron parejas de dibujos con perspectiva realizados por una computadora. Cada dibujo representaba un objeto tridimensional compuesto por 10 bloques cúbicos unidos por una cara formando una estructura articulada que exhibía tres dobleces en ángulo recto [*véase la figura 2*]. Algunas de estas parejas mostraban idénticas estructuras, normalmente presentadas en diferentes orientaciones espaciales; otras, mezcladas al azar con el primer tipo de la serie de ensayos, mostraban estructuras que diferían en figura y orientación. Estas parejas representaban estructuras enantiomórficas, que diferían por reflexión espacial, lo mismo que la mano izquierda difiere de la derecha.

En cada ensayo, el sujeto miraba por el taquistoscopio, una caja oscura donde los estímulos visuales colocados detrás podían proyectarse en momentos controlados con precisión. El experimentador insertaba un par de dibujos y encendía el interruptor correspondiente para iluminarlos, conectando simultáneamente el reloj. El sujeto comparaba entonces los dibujos con la máxima rápidez que podía y respondía tirando de una de dos palancas: tenía una a la derecha para las parejas que mostraban la misma forma y otra a la izquierda para las que mostraban formas diferentes. Al responder desconectaba automáticamente el reloj, quedando registrado así el tiempo utilizado para efectuar la comparación.

Como las parejas de dibujos representaban objetos que o bien eran idénticos o bien diferían por su reflexión espacial, los sujetos no podían basar su comparación en rasgos superficiales de los estímulos. Los números de bloques entre dos dobleces sucesivos, por ejemplo, eran idénticos en ambos dibujos tanto si las estructuras eran iguales

como si eran enantiomórficas. Se llevó a cabo una búsqueda rápida de diferencias obvias. Los sujetos decían que podían comparar las formas con sólo imaginar uno de los dos objetos girando hacia la misma orientación del otro y viendo luego si coincidían. Decían imaginar el objeto de la izquierda girado hasta el punto en que su brazo superior quedara paralelo al brazo correspondiente del objeto de la derecha; después los contrastaban mentalmente para averiguar si la extensión hasta el otro extremo del objeto se proyectaba en la misma dirección que la sección análoga de la estructura pareja. Esa era la opinión generalizada.

Los tiempos de reacción, medidos desde el momento en que se mostraban los dibujos hasta que cada sujeto respondía tirando de una palanca, aportan una prueba objetiva que respalda las actuaciones subjetivas. Los tiempos aumentaban en función lineal de la diferencia angular entre las dos orientaciones exhibidas. Cuando se mostraban objetos similares con la misma orientación, los sujetos venían a tardar un segundo en detectar la identidad; a medida que aumentaba la diferencia angular, los tiempos de respuesta también se alargaban, hasta alcanzar un promedio de 4,4 segundos para la máxima diferencia angular posible de 180 grados. Cada uno de los ocho jóvenes adultos que participaron mostró un incremento lineal del tiempo de reacción, pero la pendiente de la función variaba de unos individuos a otros.



4. TIEMPOS MEDIOS DE RESPUESTA: aumentaban en proporción directa a la diferencia angular de la orientación de objetos idénticos presentados para su comparación en parejas de dibujos. Esta relación lineal sugería la existencia de un proceso de rotación mental subyacente. La pendiente de la función, a partir de la cual puede calcularse la velocidad de rotación imaginada, no era mayor para las rotaciones que diferían en profundidad que para los objetos que diferían en su rotación dentro del plano.

Estos incrementos sugieren que los sujetos comparaban los objetos imaginando que uno de éstos rotaba tendiendo a la orientación del otro a un ritmo fijo que barría 180 grados en un promedio de 3,4 segundos (4,4 menos el segundo necesario para comparar dos objetos en idénticas orientaciones), es decir, a un ritmo medio de 53 grados por segundo. Se pueden concebir otros métodos para la discriminación de objetos idénticos y enantiomórficos, pero ninguno llevaría una cantidad de tiempo proporcional a la diferencia angular. Queda excluida, por ejemplo, la posibilidad de que los sujetos analizaran cada dibujo de una pareja por separado para reducir su estructura a un código de algún tipo y comparar después las descripciones codificadas. Un código podrá describir el número de bloques y las direcciones de los sucesivos dobleces, empezando por un extremo del objeto: 2D2A2I1 para "dos bloques, doblez a la derecha, dos bloques, doblez hacia arriba, dos bloques, doblez a la izquierda, un bloque", por ejemplo. El tiempo necesario para generar un código así podría depender de la orientación de cada objeto. Pero como los códigos se computan independientemente, la suma de los tiempos necesarios para generar los códigos correspondientes a los dos objetos no tienen por qué variar con la diferencia angular entre ambos.

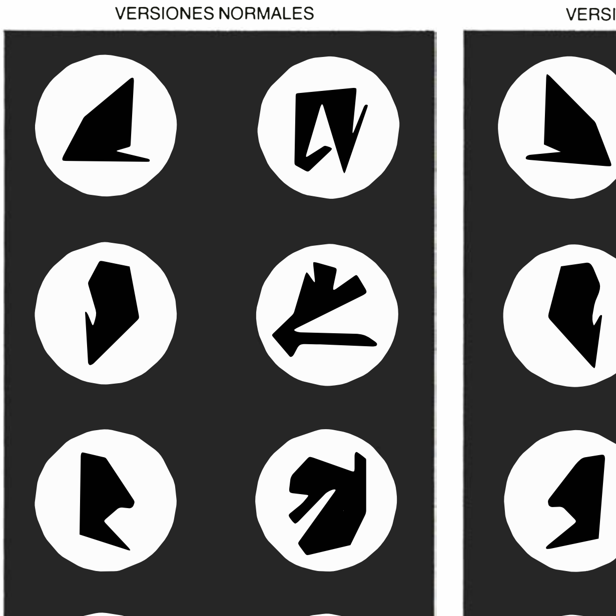
Los resultados no solamente apuntan hacia la rotación mental como base de este tipo de comparación; también indican que las imágenes mentales de los sujetos representaban la estructura tridimensional de los objetos ofrecidos y no simplemente los rasgos bidimensionales de los dibujos. En la mitad de las parejas con la misma forma las orientaciones mostradas diferían en su rotación dentro del plano bidimensional del dibujo; así pues, eran idénticos a excepción de su posición en el plano. La otra mitad de las parejas representaba objetos cuyas rotaciones diferían en profundidad [*véase la figura 3*]. Aunque los objetos tridimensionales ilustrados en cada pareja de este segundo grupo de dibujos eran idénticos, los dibujos en sí, como disposiciones bidimensionales de líneas y ángulos, a menudo diferían considerablemente: una rotación en profundidad altera simultáneamente ciertos rasgos de un objeto tridimensional representado en el plano de un dibujo eliminando otros rasgos del mismo plano.

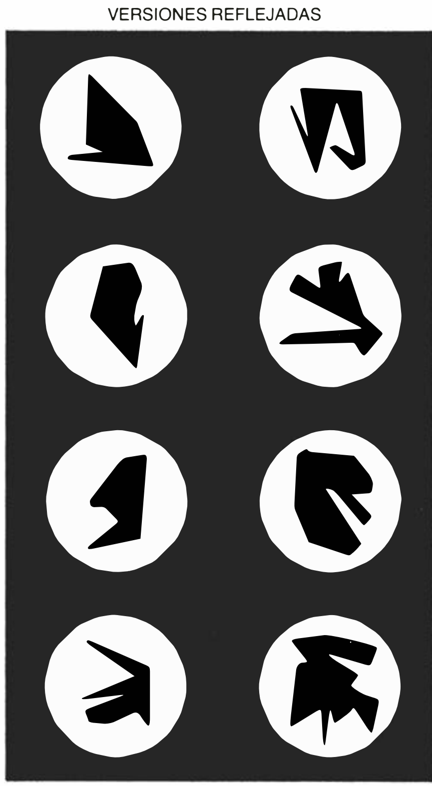
Sin embargo, la pendiente de la función del tiempo de reacción no era mayor para las parejas correspondientes a una rotación en profundidad que para aquellas cuyos dibujos diferían en su rotación dentro del mismo plano. La velocidad de rotación imaginada era tan rápida cuando la transformación representada implicaba tres dimensiones como cuando la rotación parecía tener lugar en dos dimensiones. Los resultados corroboraban los informes de los propios sujetos. Ellos declararon que habían interpretado todos los dibujos, cualesquiera que fueran sus orientaciones relativas, como objetos sólidos en un espacio tridimensional. Por tanto, los sujetos hallaron igualmente fáciles de imaginar todas las rotaciones.

La naturaleza espacial y progresiva de las rotaciones imaginadas establecida en el primer experimento sugiere que el proceso es análogo a las transformaciones que se dan en el mundo físico. Resulta tentador considerar la rotación imaginada como la simulación interna de una rotación externa. Sin embargo, esta descripción estaría justificada tan sólo si pudiéramos demostrar que el proceso interno recorre fases intermedias correspondientes a las orientaciones intermedias de un objeto físico girando en el mundo externo.

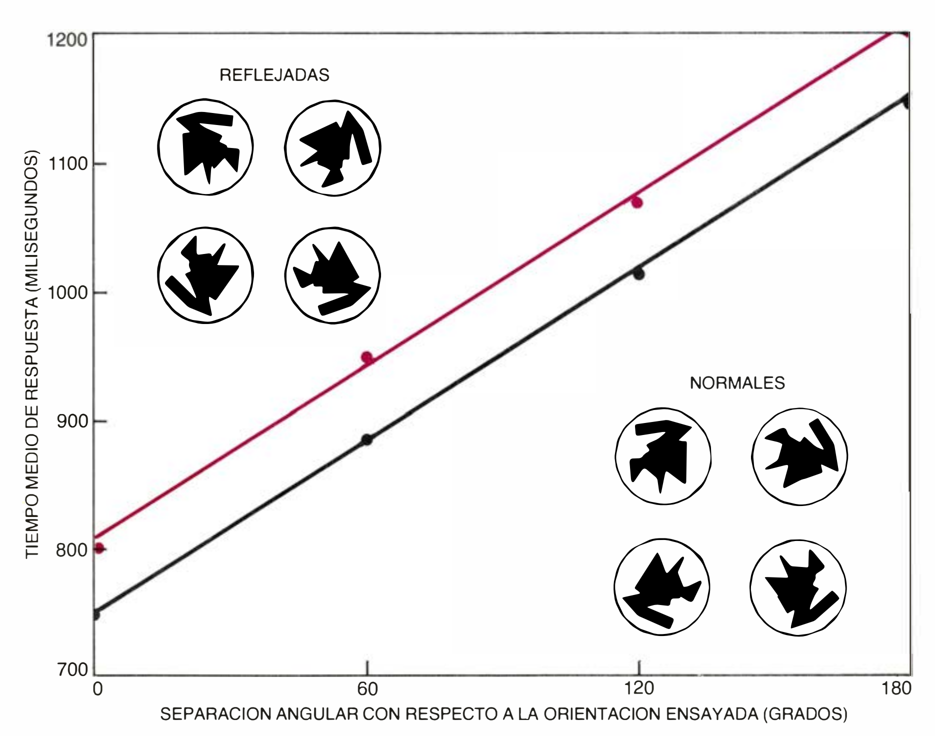
Con objeto de reunir esta prueba adicional de la naturaleza análoga de la rotación mental, uno de nosotros (Cooper) realizó una serie de experimentos en los que los sujetos respondían no a un par de objetos, sino a una sola figura, expuesta a intervalos y colocada en diversas orientaciones. Desencadenando una rotación imaginada con un solo estímulo y presentando luego el mismo u otro objeto diferente en cualquier orientación y tras cierta demora, pudimos estudiar la transformación mental según tenía lugar.

Sin embargo, antes de explorar el proceso de rotación sobre la marcha, era necesario resolver una cuestión inicial y por tanto efectuar una breve digresión experimental. Teníamos que establecer que la técnica del estímulo





5. VARIEDAD SUFICIENTE DE LAS FORMAS BIDIMENSIONALES empleadas en la prueba. Abarcaba ocho polígonos diferentes, con sus correspondientes versiones especulares. Antes de dar comienzo a una serie de experimentos en los que se mostraba a los sujetos una de las formas en una orientación poco familiar, cada participante aprendía a distinguir la versión "normal" (*izquierda*) de la "reflejada" (*derecha*) de cada forma en una orientación concreta. Las ocho formas varían en el número de puntos que definen sus perímetros. No obstante, la complejidad de una forma no ejerció efecto alguno sobre la velocidad a la que los sujetos de las pruebas distinguieron luego su forma normal de la reflejada.



6. SE HALLO UNA RELACION LINEAL entre tiempo de respuesta, calculado en milisegundos (*ordenadas*), y orientación de la prueba, medida en grados (*abscisas*), cuando los sujetos veían un polígono familiar en una orientación nueva y determinaban si se trataba de la versión normal (*gráfico inferior*) o de la versión reflejada (*gráfico superior*) de la forma. Para evaluar la forma en cuestión parece ser que los sujetos tenían que imaginar una rotación de la forma normal a fin de ver si llegaba o no a coincidir con la forma presentada. Si no coincidía, el sujeto aún necesitaba de un incremento extra de tiempo para indicar que la forma que tenía ante él era la versión reflejada. (Las ilustraciones son obra de Alan D. Iselin.)

único hace que los sujetos imaginen las mismas rotaciones mentales progresivas que en los dibujos emparejados de la primera prueba. Para evaluar el procedimiento del estímulo único volvimos a pedir a los sujetos que distinguieran entre un objeto y su imagen especular. En este caso, utilizamos figuras planas bidimensionales en lugar de los sólidos tridimensionales del experimento anterior. En consecuencia, todas las orientaciones mostradas diferían en sus rotaciones sobre un plano.

Los sujetos aprendieron primero a diferenciar la versión normal de la especular de cada uno de los ocho polígonos que se les presentaron, cuyas orientaciones se mantuvieron constantes a lo largo de este entrenamiento [*véase la figura 5*]. Una vez que los sujetos hubieron aprendido las ocho discriminaciones, comenzaron los ensayos experimentales.

En cada ensayo se mostraba al sujeto uno de los polígonos en una orientación que coincidía con su posición durante la fase de entrenamiento, o bien difería de ella en algún múltiplo de 60 grados. Al sujeto cumplía determinar si se trataba de la forma normal o de la versión reflejada del polígono; para efectuar la discriminación, el sujeto debía imaginar, cabe presumirlo, el polígono girando hasta coincidir, o no coincidir, con la representación mental de la forma normal que había aprendido durante el ensayo. En el caso de coincidir, el sujeto presionaba un botón que tenía a mano derecha y que correspondía a la versión "normal". Cuando no había coincidencia, el sujeto presionaba el botón de la izquierda, que correspondía a la versión "reflejada".

De igual modo que el procedimiento de estímulos emparejados, este test arrojó un incremento lineal del tiempo de reacción con el aumento de la separación angular; separación, en este caso, de una posición aprendida y no de la orientación de un objeto expuesto simultáneamente. Los sujetos respondían a las versiones normales de los polígonos de la prueba una constante de 60 milisegundos más deprisa que a las versiones reflejadas; parecía que los sujetos comparaban primero la forma de prueba transformada con un recuerdo de la forma normal y podían reaccionar para hacerlas coincidir inmediatamente, pero necesitaban un intervalo extra para iniciar la respuesta "reflejada" si las formas no se correspondían.

Sin embargo, las pendientes de las funciones del tiempo de reacción para las formas de prueba normales y reflejadas eran idénticas. La tasa media

inferida de rotación mental era de 450 grados por segundo, considerablemente superior a los 53 grados por segundo estimados en el experimento anterior de dos estímulos simultáneos. Evidentemente, el uso de imágenes planas, presentadas de una en una, permitía respuestas más rápidas al dejar a los sujetos centrar más su atención sobre su único estímulo. A pesar de las diferencias cualitativas, los resultados de este procedimiento son paralelos a los del anterior.

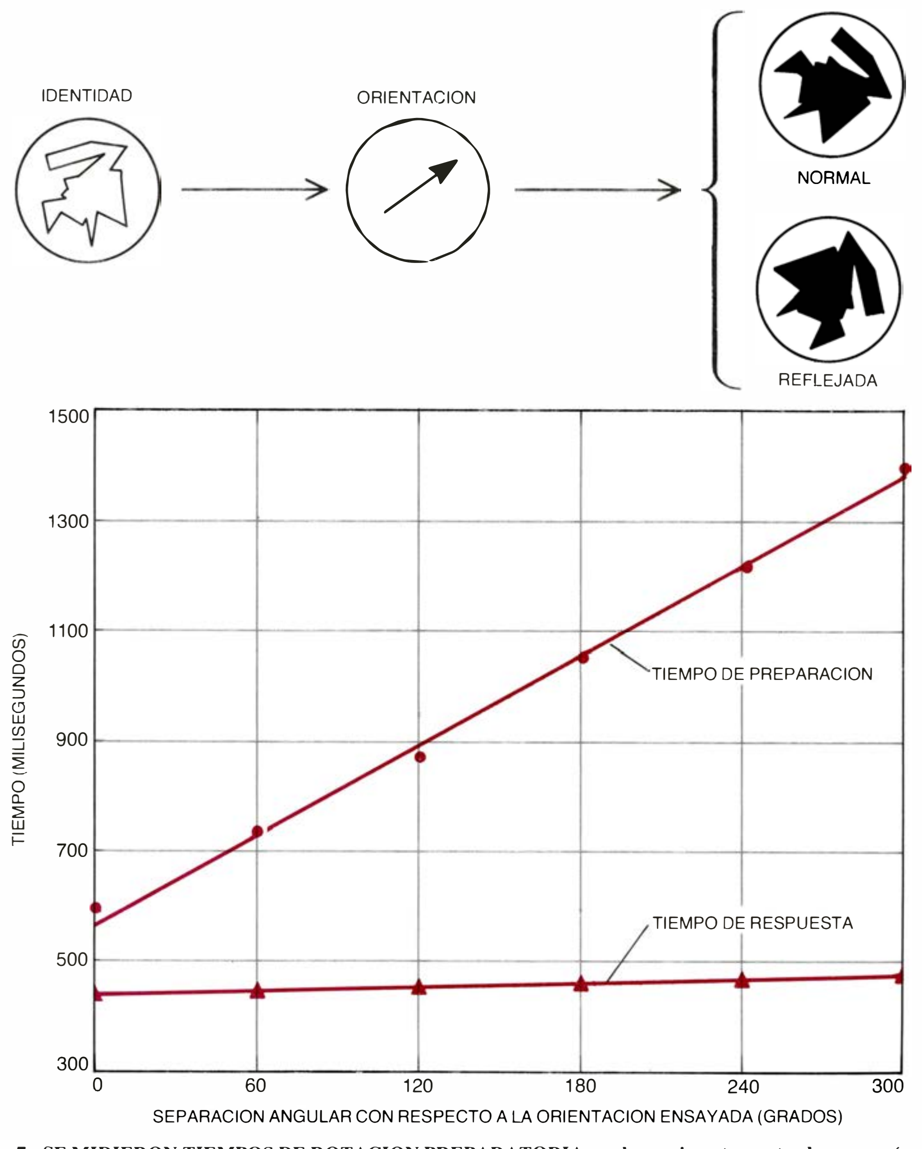
Una vez determinado que la prueba bidimensional con un sólo estímulo requiere una rotación mental como la que exigía la comparación de dos estímulos, modificamos el procedimiento para estudiar más estrechamente la hipótesis según la cual la rotación mental es análoga a las rotaciones que se dan en el mundo físico. El segundo de los experimentos con un único estímulo sometió a prueba directamente las afirmaciones de los sujetos de que apreciaban un estímulo imaginando su giro hasta hacerlo coincidir con la forma aprendida. Invertimos la anterior secuencia de acontecimientos: en lugar de presentar a los sujetos un estímulo para que lo compararan con una forma aprendida, lo que les exigía imaginar una rotación correctiva, les pedimos primero que imaginaran la rotación de una forma aprendida; sólo entonces les presentamos un estímulo para su comparación.

Todos los sujetos de este experimento habían participado en el anterior, también con un único estímulo, y estaban familiarizados con las formas de la prueba. En cada ensayo el sujeto veía un dibujo de la silueta de uno de los ocho polígonos normales que se exponían en la misma orientación de la fase de entrenamiento. Dicha silueta iba seguida de un círculo que contenía una aguja indicadora, colocada en uno de los seis incrementos angulares igualmente espaciados, desde 0 hasta 300 grados de rotación en el sentido de las agujas del reloj. El sujeto imaginaba entonces la forma siluetada girando con la orientación indicada por la aguja. En la mitad de los ensayos se les dijo a los sujetos que efectuaran la rotación mental en sentido horario; en la otra mitad se les dijo que imaginaran la forma expuesta girada en sentido antihorario.

Para indicar que la operación mental ya había acabado, el sujeto presionaba un botón, deteniendo de este modo el reloj que registraba el tiempo de preparación. Simultáneamente, aparecía una versión del polígono representado en una orientación indicada por una flecha y se ponía en marcha un segundo reloj; tan rápido como le resultaba posible, el sujeto decía por un micrófono si el dibujo expuesto era la versión normal o la reflejada pronunciando la "N" (para "normal") o "R" (para reflejada). Automáticamente un relé activado por la voz detenía el segundo reloj.

Cada ensayo arrojaba dos tiempos: el tiempo requerido para efectuar la rotación mental y el intervalo necesario luego para que el sujeto clasificara el estímulo de prueba. Ambos conjuntos de resultados confirmaron los hallazgos anteriores. El tiempo necesario para la rotación mental preparatoria aumentaba de modo lineal con la separación angular de la orientación de entrenamiento, tal como nos habían inducido a esperar los resultados anteriores. Más aún, en los experimentos provisionales no se especificaba la dirección de la rotación mental; la rotación contrastable máxima era de 180 grados. Aquí, el incremento lineal del tiempo de preparación se extendió a la rotación máxima, en el sentido de las agujas del reloj o en el contrario, de 300 grados, corroborando de nuevo que la operación mental era análoga a una rotación física. La tasa inferida de las rotaciones preparatorias, que presentaba una media de 370 grados por segundo, era comparable a los 450 grados por segundo estimados en el experimento anterior también de estímulo único.

El segundo grupo de tiempos, que registraba el intervalo requerido por los sujetos para responder al estímulo de prueba que aparecía después de que ellos dieran señales de estar prepara-



7. SE MIDIERON TIEMPOS DE ROTACION PREPARATORIA en el experimento mostrado esquemáticamente arriba; los datos se recogen en la gráfica inferior. Los sujetos primero veían la silueta de uno de los ocho polígonos normales, seguida por una flecha. Imaginaban la forma ahora únicamente presente en su memoria, rotando en la orientación indicada por la flecha. Cuando la operación mental terminaba, presionaban un botón, lo que hacía aparecer una forma de prueba en la señalada orientación, y determinaban con la máxima rapidez posible si esta forma era la normal o su versión reflejada. El tiempo necesario para la rotación mental preparatoria aumentaba con el ángulo; la respuesta a la forma de prueba confirmaba que el proceso de rotación preparaba para juzgar la forma reorientada.

dos, confirmó el hecho de que el acto de rotación mental los preparaba para efectuar la discriminación. Por término medio, clasificaban cada forma de prueba como normal o reflejada en menos de medio segundo, con independencia de su separación angular de la posición aprendida. Si los sujetos hubieran necesitado hacer más operaciones mentales después de hallarse frente al estímulo de prueba, es de presumir que los tiempos de respuesta hubieran aumentado con la separación angular del estímulo de prueba, tal como había ocurrido en los experimentos anteriores donde los sujetos no habían tenido oportunidad de rotación mental preparatoria.

Todos los experimentos aquí descritos hasta el momento reseñan ciertas características de las rotaciones mentales consumadas. Vimos que el tiempo requerido aumentaba en proporción directa al ángulo de rotación, confirmamos la hipótesis de que, una vez imaginada la rotación de una forma en la orientación de un estímulo físico, el sujeto puede determinar identidad o diferencia a una velocidad uniforme, sea cual sea el grado de rotación. Mas para caracterizar el proceso mental como análogo a las rotaciones físicas, había que demostrar antes que el proceso mental atraviesa unas etapas que corresponden a los ángulos intermedios de una rotación física. Cuando se produce dicha correspondencia, el ángulo al que una forma expuesta provocará la respuesta más rápida de un individuo que esté imaginando una rotación en marcha de la forma podría cambiar de manera uniforme y progresiva con el tiempo, al compás de la rotación mental.

Los sujetos del experimento siguiente, destinado a la contrastación de esta hipótesis, eran todos veteranos de los dos experimentos anteriores con un solo estímulo y estaban familiarizados con los ocho polígonos de prueba. En cada intento aparecía en el taquistoscopio un campo circular en blanco y se pedía al sujeto que imaginara un determinado polígono rotando dentro del campo a una tasa natural en el sujeto. Tras un intervalo impredecible, esa forma, o su imagen especular, aparecía; el sujeto entonces identificaba la versión tan rápidamente como le resultaba posible.

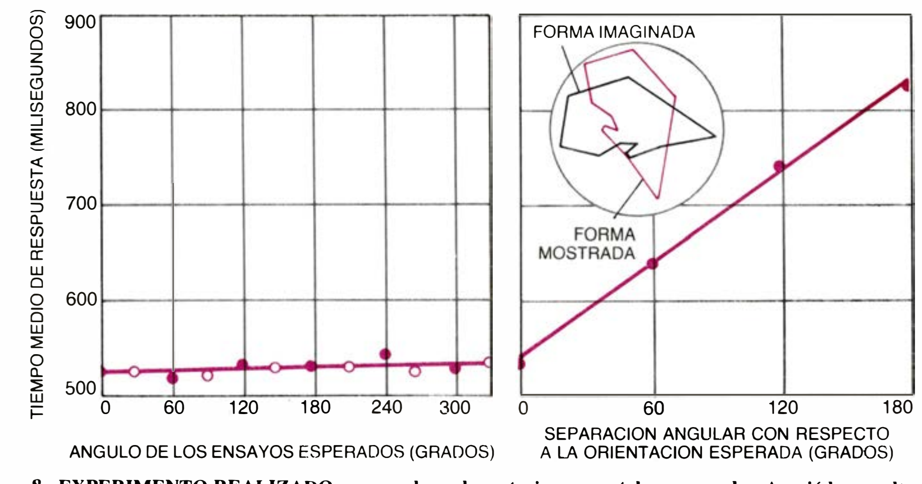
Como ya teníamos datos abundantes sobre la tasa de rotación de cada individuo, pudimos hacer ensayos a la medida de cada sujeto. A partir de los experimentos anteriores inferimos los tiempos y ángulos a los que cada sujeto debía estar a punto para responder a la forma de prueba. En la mitad de los ensayos, llamados ensayos de "figura esperada", presentamos la forma de prueba con un ángulo y un tiempo que se pensaba iba a coincidir de manera precisa con la rotación mental en marcha. En los demás ensayos se expuso la forma en una orientación que difería en distintos ángulos de la que se calculaba iba a ser la orientación imaginada en ese momento. Denominamos a este segundo tipo de ensayo "de figura no esperada".

Cuando un sujeto imagina necesariamente un objeto en orientaciones intermedias a lo largo de su curso de rotación mental, la respuesta a un ensayo cronometrado y orientado se emitirá con rapidez uniforme sea cual sea el ángulo contrastado. Los tiempos de reacción en los ensayos "de figura esperada" ratificaban nuestra hipótesis: los tiempos de respuesta en los ensayos en los que se exponía la figura en una orientación esperada se mantenían constantes a aproximadamente medio segundo para cada ángulo.

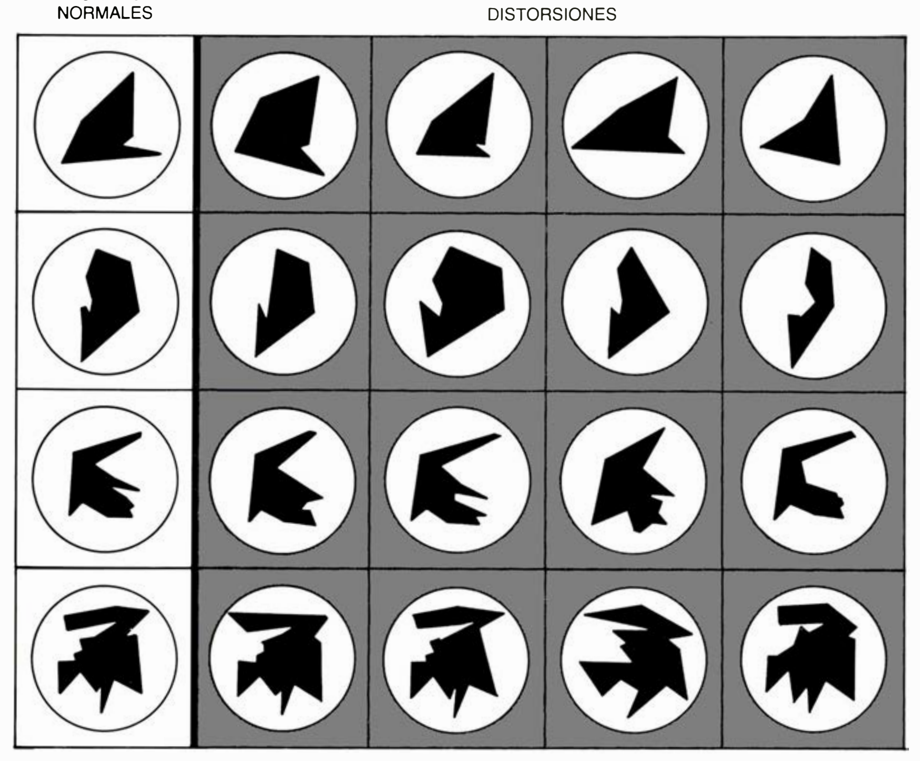
Hay otro rasgo característico de los ensayos de figura esperada que resulta instructivo. Las orientaciones de la mitad de las figuras ensayadas eran múltiplo de 60 grados, es decir, las mismas orientaciones que se habían utilizado en el anterior experimento de un solo estímulo. Las otras figuras "esperadas" fueron expuestas en ángulos poco familiares, todos diferentes y múltiplos de 30 grados. Si, como nosotros proponíamos, la rotación mental no salta de forma discontinua de un ángulo a otro, sino que progresa de modo uniforme a través de unos estados que corresponden a ángulos intermedios, los tiempos de respuesta a figuras adecuadamente cronometradas en los mencionados ángulos poco familiares deben aproximarse a los correspondientes a ángulos de figuras muy conocidas por los sujetos. Los tiempos de respuesta casi idénticos a orientaciones familiares y a orientaciones inhabituales echaron por tierra nuestra hipótesis.

Cuando la figura ensayada se desviaba de la orientación esperada, los tiempos de reacción aumentaban de modo lineal con el ángulo de la discrepancia. Estaba claro que los sujetos tenían que imaginar una rotación correctiva adicional cuando se les presentaba una forma de prueba que no coincidía con su representación mental en ese momento; la corrección llevaba un tiempo proporcional al ángulo de la desviación. Este hallazgo aporta las nuevas pruebas de que resultaba crucial para los tiempos de respuesta breves y constantes la correspondencia entre las orientaciones imaginadas y las expuestas, y no la familiaridad de los sujetos con las formas en todas las orientaciones. Los tiempos de corrección indican que, aunque los sujetos de la prueba estuvieran entrenados, no podían evaluar las formas expuestas sin efectuar primero una rotación mental.

Considerados en conjunto, nuestros resultados aportan datos objetivos de un proceso mental que modela la rotación de los objetos en el mundo físico. Los dos descubrimientos centrales



8. EXPERIMENTO REALIZADO para explorar las rotaciones mentales en marcha. Arrojó los resultados que aparecen en el gráfico. Cuando un sujeto imaginaba una forma rotando y cronometraba la presentación de una forma de prueba hasta que su orientación coincidía con la orientación momentánea de la forma imaginada, los tiempos de respuesta eran cortos en todo ángulo ensayado (*izquierda*). En los resultados no influía que algunos ensayos (*puntos abiertos*) mostrasen orientaciones que los sujetos no habían visto en experimentos anteriores; en lugar de quedarse a caballo entre dos posiciones aprendidas, los objetos son imaginados pasando a través de orientaciones intermedias, que es como se comportan los objetos que rotan en el mundo físico. Cuando los investigadores hicieron deliberadamente que no coincidieran la forma de prueba y la orientación que el sujeto imaginaba (*dibujo y gráfica de la derecha*), los tiempos de respuesta aumentaron con la discrepancia angular. Es de presumir que los sujetos sometidos a ensayo tuvieran que imaginar una rotación compensatoria para evaluar la forma de prueba.



9. DISTORSIONES DE LAS FORMAS NORMALES. Sometieron a prueba la fidelidad con que se retienen los ragos de un estímulo físico cuando éste ha rotado mentalmente. Tras indicar una orientación en la que tenía que imaginarse que rotaba una de las formas normales, se ofrecía la forma normal reorientada o una distorsión de la misma. Los sujetos detectaban incluso las variaciones más pequeñas; en el proceso de rotación mental se conserva, pues, gran parte de la riqueza estructural de la forma original.

son la relación lineal del tiempo de reacción con la diferencia de orientación, cuando se compara la forma intrínseca de dos estímulos, y la rapidez uniforme de respuesta, cuando se presenta un objeto de prueba en una posición calculada para coincidir con la orientación constantemente cambiante que se imagina en la rotación mental. Hemos reunido datos precisos y reproducibles sobre un fenómeno aparentemente subjetivo del tipo que en el pasado se consideraba fuera del alcance de la psicología experimental.

Todavía quedan dudas por resolver acerca de la naturaleza de las transformaciones mentales que hemos estudiado. Aunque hemos establecido que determinar la identidad de objetos expuestos en diferentes orientaciones puede requerir imaginar una rotación pasando por orientaciones intermedias, no afirmamos que la rotación sea continua en el sentido matemático estricto, que requiere el paso por todos los ángulos intermedios posibles. No conocemos las bases neurofisiológicas de las imágenes mentales ni de su manipulación interna.

Y más dudas. ¿Cuántos detalles de los correspondientes objetos físicos conservan las imágenes mentales cuando se transforman? Experimentos recientes sugieren que las representaciones mentales pueden conservar gran parte de la riqueza estructural de sus contrapartidas materiales. En una investigación realizada por Cooper y Peter Podgorny (antiguo alumno), los sujetos consiguieron discriminar formas de prueba rotadas de formas normales no solamente cuando las figuras ensayadas diferían de reflejos en el espacio, sino también cuando la distinción era cuestión de perturbaciones locales sutiles e impredecibles.

A pesar de ciertos problemas sin resolver la estrecha coincidencia que hemos encontrado, entre las rotaciones mentales y sus contrapartidas en el mundo físico, conduce inevitablemente a especulaciones en torno a las funciones y al origen de la imaginación espacial humana. Quizá no sea prematuro proponer que la imaginación espacial ha evolucionado como reflejo de la física y la geometría del mundo exterior. Las reglas que gobiernan estructuras y movimientos en el mundo físico quizá se hayan incorporado, a lo largo de la historia evolutiva, a la maquinaria perceptiva del hombre, dando lugar a correspondencias demostrables entre la imaginación mental y sus análogos físicos. Empezamos a distinguir aquí una mecánica mental tan precisa como el esquematismo innato propugnado por Chomsky para el lenguaje.

El navío de línea español

Todo el mundo está convencido de que los mayores navíos de guerra de la época de la vela eran ingleses, aunque en realidad el más grande y artillado de aquel tiempo fue el español "Santísima Trinidad"

John D. Harbron

El 21 de octubre de 1805, en cabo Trafalgar, la flota inglesa al mando del almirante Lord Horatio Nelson destruyó la escuadra franco-española, en un combate naval que fue el último y el más sangriento de la era de la vela. Esta derrota significó el fin de España como potencia naval y, a los ojos del mundo, los ingleses se convirtieron en los mejores navegantes, proyectistas y constructores navales del siglo XVIII. Sin embargo, los oficiales y marineros de la época eran plenamente conscientes de que el más temible de todos los navíos que intervinieron en Trafalgar era el *Santísima Trinidad*, de 1900 toneladas, por tratarse de un verdadero fortín flotante, con costados de caoba de 60 centímetros de grueso, y tripulado por unos 1200 hombres, entre marineros y soldados. En más de una ocasión el propio Nelson lo alabó por sus características y robustez, aunque lo admiraban también la mayoría de enemigos de España. Una muestra de su valor como máquina de guerra se desprende de los acontecimientos que sufrió tras ser apresado por los ingleses durante la batalla. Inmediatamente, y ante el temor de que fuera reapresado por los restos de la flota española en retirada, los ingleses intentaron remolcarlo hasta Gibraltar, aunque los daños que había sufrido durante el combate y el temporal que se desencadenó a continuación se encargaron de impedirlo, hundiéndose dos días después. Así pues, todo lo que conocemos de este navío tan formidable procede de relatos contemporáneos.

Por lo general, los historiadores no hablan de la construcción naval española, y probablemente ello se debe a las derrotas que sufrió la marina arbolando este pabellón durante el siglo XVIII. No obstante, la realidad es que tales derrotas se debieron a la superioridad, tanto en táctica como en disciplina, de los ingleses, pero en ningún caso a los defectos de la construcción naval española, olvidando además, y con gran parcialidad, el éxito con que España organizó y mantuvo las rutas mercantes del Nuevo Mundo.

Los navegantes españoles de los siglos XV y principios del XVI ampliaron considerablemente el mundo conocido y a principios del 1600, escasamente 80 años después del desembarco de Hernán Cortés en México, habían fundado de 40 a 50 establecimientos en América del Sur, la mayor parte de los cuales sólo se podían defender y avituallar por vía marítima; de ahí que el éxito de tales establecimientos sea obligado atribuirlo, en buena parte, a la existencia de una construcción naval de gran calidad y que se mantuvo durante más de 300 años.

La colonización del Nuevo Mundo hubiera sido imposible de realizar con el tipo de buque más destacado, en todos los aspectos, de la construcción naval española: la *galera*, una nave de mucha eslora y poca manga, propulsada a remo y vela, y que intervino en todos los combates navales sostenidos en el Mediterráneo durante la Edad Media. (La última gran batalla naval de la época del remo, en la que una flota combinada de galeras de España y de otros países europeos derrotó a los turcos, se produjo en las costas de Grecia, y concretamente en Lepanto en 1571.) La *galera*, sin embargo, era difícilmente utilizable para las travesías del Atlántico, por tratarse de unos viajes muy duros y de larga duración. Por esta razón tanto Colón como sus seguidores se valieron de las llamadas naves de alto bordo, hasta el extremo de que a fines del siglo XVI las unidades de este tipo habían reemplazado prácticamente a la *galera* en la marina española. Al ser mucho más manguda y tener varias cubiertas, la capacidad de la nave de alto bordo era mayor que la de cualquier galera y por tal motivo podía llevar más carga, gente, cañones y velas, todo lo cual era imprescindible para los grandes viajes comerciales y de descubrimiento. Además, al tener el casco de fondos redondeados y cerrado de bocas, la nave de alto bordo era muy marinera.

La nave de alto bordo arbolaba tres palos y respondía a dos proyectos básicos bien distintos, conocidos por *galeón* y *navío*. Los *galeones* españoles eran las naves mercantes que transportaban los cargamentos de oro, plata y materias primas, y llevaban un elevado número de tripulantes y pasajeros. Los *navíos*, en cambio, eran buques de guerra, que se caracterizaban por el grosor del forro y llevar cañones; los más artillados se conocían como *navíos de línea* y eran los que iban en cabeza en los enfrentamientos navales. El gran navío español de mediados y fines del siglo XVIII fue la culminación de tres siglos de construcción de naves de alto bordo y de tres palos, siendo el *Santísima Trinidad* el mejor ejemplo de ello.

¿Cómo se construía un navío en el siglo XVIII? La técnica empleada por los españoles era muy similar a la que se utilizaba en los demás países europeos. La columna vertebral del esqueleto del buque era la quilla, que se extendía de la roda hasta el codaste, y que servía de soporte a los demás elementos estructurales. Es decir, de la quilla partían las varengas o cuadernas, que a su vez iban recubiertas por los forros interior y exterior. En el forro exterior se distinguían las llamadas *cintas*, por ser de mayor grueso que el resto de la tablazón. Destacaba también, entre los elementos estructurales, los llamados *baos*, por ser las vigas que unían ambos costados del casco entre sí y servían de soporte a las cubiertas.

La obra se fijaba por medio de pernería de roble, caoba o hierro, hecha en el propio astillero. En el *Santísima Trinidad* algunos de tales pernos de hierro tenían 1,80 metros de largo. En

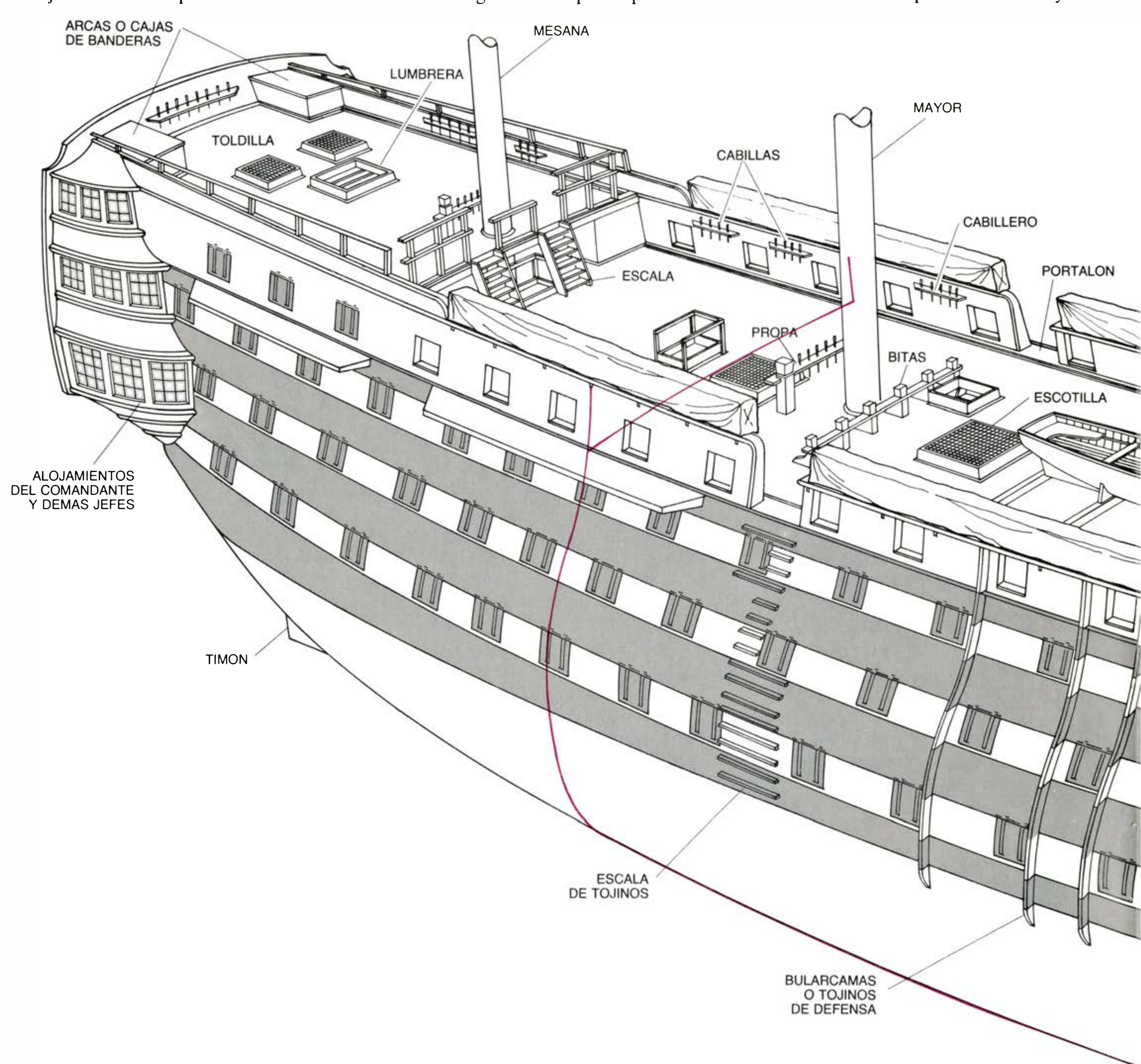


1. EL *SANTISIMA TRINIDAD*, el navío de mayor porte de cuantos participaron en la batalla de Trafalgar, según un grabado del artista contemporáneo Alejo Berlinguero de la Marca y Gallego, cuyo original se conserva en el Museo Naval, de Madrid. El navío fue construido en el Astillero Real de La Habana en 1769 y estaba hecho de caoba y pino de México y América Central. Los ventanales de la popa, pertenecientes a los alojamientos de los oficiales, estaban muy adornados, aunque proporcionaban escasa protección. En el siglo XVIII la táctica naval exigía que la maniobra inicial del navío atacante fuera a colocarse en una posición tal que la primera andanada pudiera batir la popa del enemigo. La cubierta de la cuarta batería que se aprecia en la ilustración se puso en una reforma posterior, lo que hizo del *Santísima Trinidad* el navío más artillado del siglo XVIII. La dotación estaba formada por 1200 hombres, entre marinos y soldados, y aunque recibió varias andanadas de los cañones ingleses, no se hundió durante el propio combate de Trafalgar.

cualquier caso, los pernos se ponían en los agujeros taladrados previamente, manteniéndose en posición por medio de tuercas de hierro o de madera. Pero mientras la obra de construcción progresaba en el dique seco, en los talleres se confeccionaban las velas de lona y elaboraba la jarcia de cáñamo destinada a asegurar la arboladura y maniobrar las velas.

Sin embargo, para el navegante, lo más importante era el comportamiento de todo ello en la mar, es decir, del conjunto formado por la estructura de madera, las velas y la jarcia. Los efectos del viento y de la mar en los miles de piezas de madera unidas con cabillas de ese mismo material o con pernos de hierro eran mucho más acusados que en los veleros actuales, y los marineros, siguiendo las órdenes de sus superiores, no cesaban de mantenerlo todo constantemente en equilibrio. El *navío*, crujía, gemía, cabeceaba y daba balances en su andar a través de los océanos del mundo; su comportamiento era totalmente distinto del que han conocido los navegantes de épocas posteriores. De hecho, los grandes veleros existentes hoy en día son de casco de acero, y por tanto de una construcción muy robusta y rígida.

El secreto del éxito de la construcción naval española fue la gran calidad de la madera empleada por los astilleros. Los cascos de las *naves* de guerra inglesas y francesas eran de roble, en tanto que los palos y vergas se hacían de pino. En cambio, las colonias españolas de América suministraban a la marina de la metrópoli maderas muy

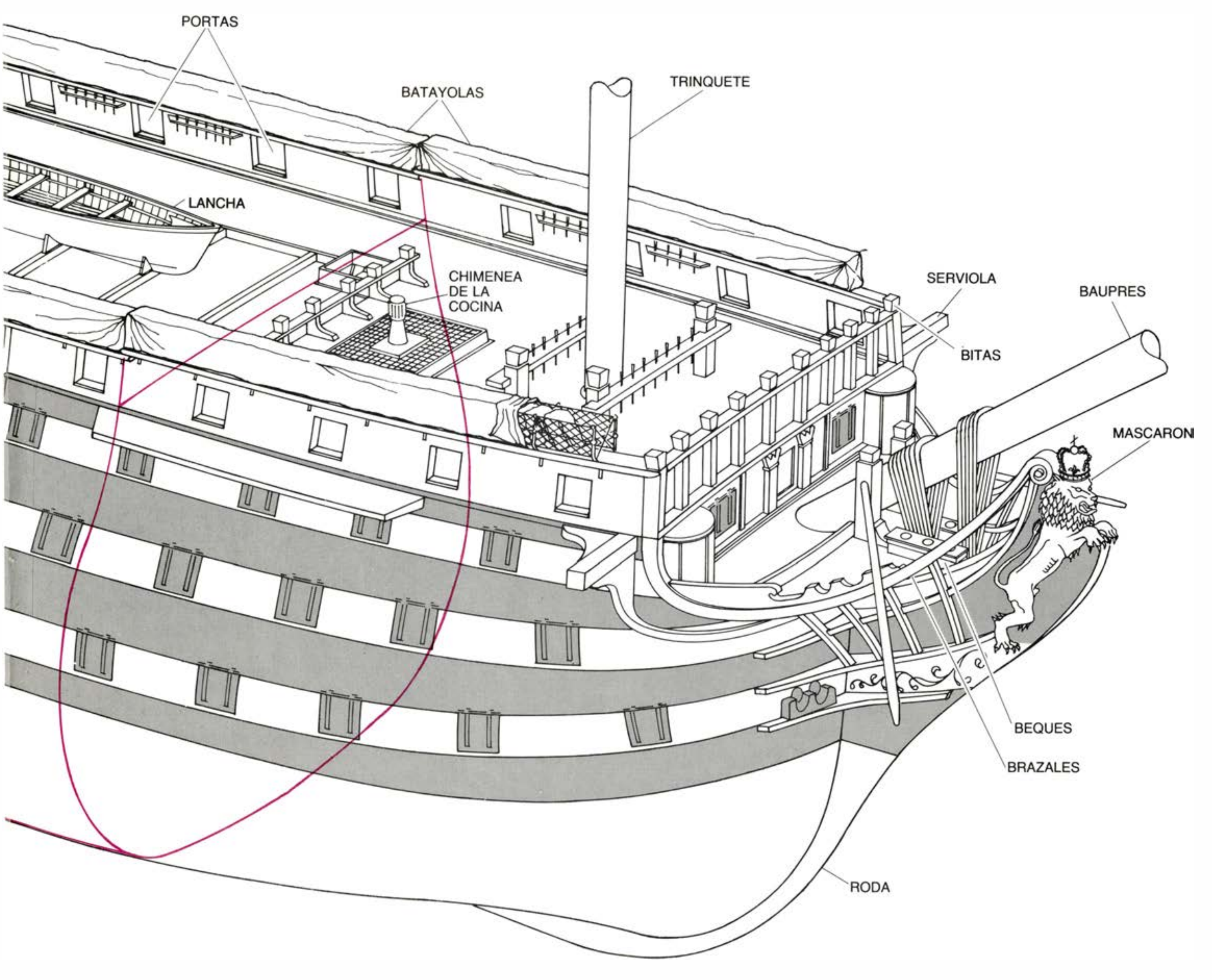


2. RECONSTRUCCION ESQUEMATICA del *Santísima Trinidad*, basada en un dibujo de Rafael Berenguer Moreno Guerra, coronel de Intendencia de la Armada Española, inspirado en descripciones de la época. El navío tenía unos 62,3 metros de eslora y desplazaba unas 1900 toneladas; una vez se le corrió el cuarto puente, el navío llevó 144 cañones, cantidad muy superior a la de cualquier otro. Los cabilleros, bitas y propaos estaban distribuidos convenientemente por cubierta, al objeto de poder amarrar las tiras de la jarcia de labor. Los coys, cuando no estaban en uso, se estibaban en las batayolas para formar el empalletado con que se protegía la cubierta. Las líneas de color indican los límites de la sección que se muestra en la ilustración siguiente.

duras, como la caoba, procedentes de Cuba y de la costa de la actual Honduras. La caoba, concretamente, es mucho más resistente que el roble a los efectos de la putrefacción, producida por un hongo que consume la celulosa de la madera hasta convertirla en una especie de esponja que se reduce fácilmente a polvo. Este problema afecta a todos los buques de madera, de modo que la posesión de fuentes de aprovisionamiento de madera dura era esencial para cualquier marina, no sólo en lo que respecta a la construcción de nuevas unidades, sino para la reparación de las existentes.

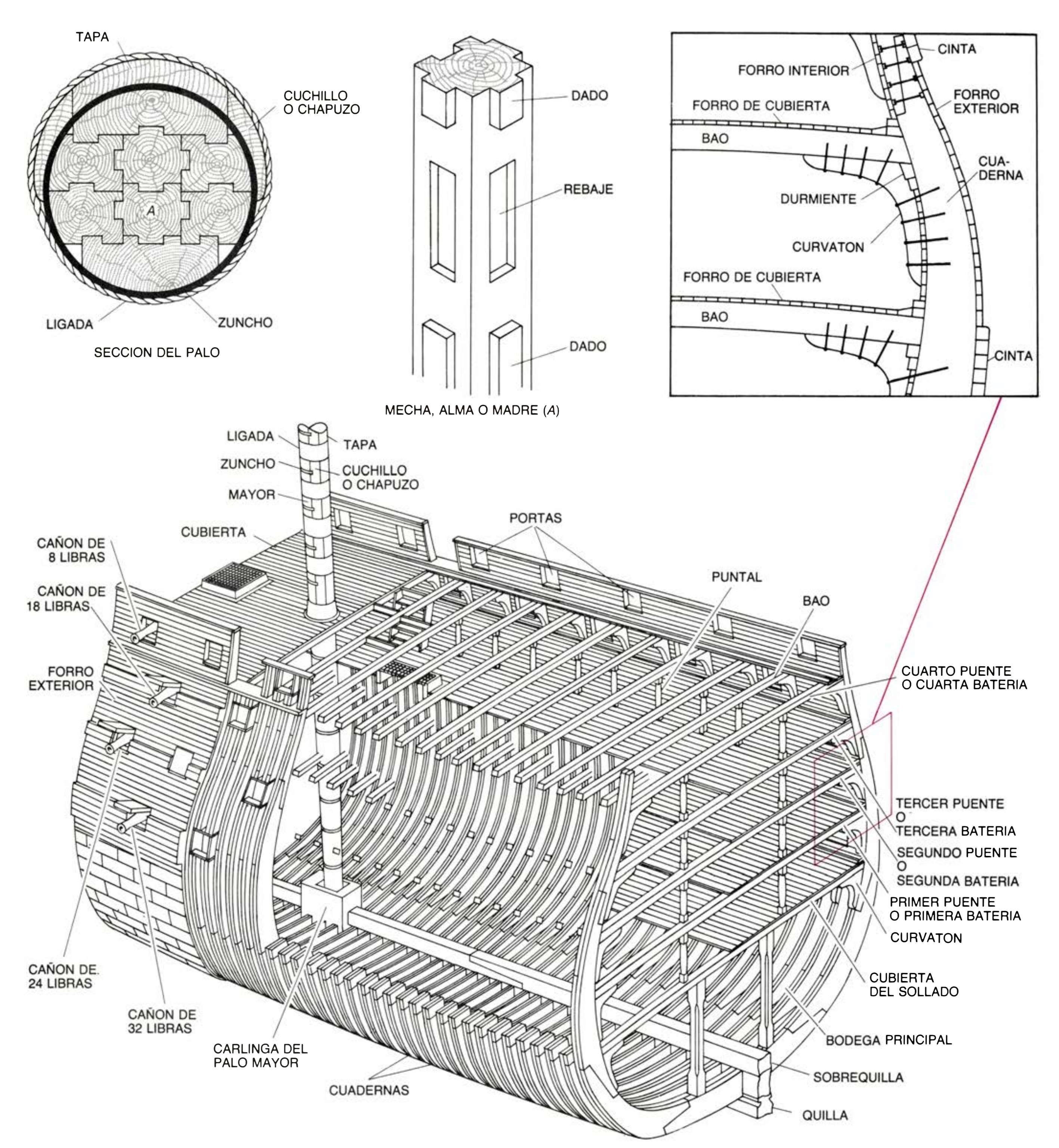
Con el empleo de madera dura, el intervalo entre reparaciones de los buques podía ser muy amplio, lo que representaba una gran ventaja para la marina que disponía de ella. Por esta razón, mientras los franceses e ingleses dudaban de su capacidad de obtener el roble y pino necesarios para la construcción y mantenimiento de las flotas respectivas, España estaba suficientemente surtida de madera dura procedente de las colonias americanas. La mayor parte de esa madera llegaba al astillero real de La Habana, donde se construyeron 74 de los 221 *navíos* puestos en servicio por España durante el siglo XVIII, y siendo en la década de 1770 el principal país constructor de navíos del mundo. El *Santísima Trinidad*, con casco y cubiertas hechos exclusivamente de caoba, se botó en La Habana en 1769.

La cantidad de madera empleada en la construcción de un navío era impresionante: en total se necesitaban



unos 3000 árboles, cada uno de los cuales proporcionaban unos 180 metros tablazón, y esto para un navío de tercera clase, la unidad básica de todas las marinas europeas. El pino para la arboladura crecía en abundancia en el actual México, necesitándose unos 40 árboles para hacer las 22 vergas de un navío de tres palos y de tercera clase. En la era preindustrial de fines del siglo XVIII, el astillero era el centro manufacturero más importante y los grandes navíos de línea las obras de mayor envergadura que se realizaron antes de la revolución industrial. De todos modos, los 60 navíos de tres puentes que participaron en la batalla de Trafalgar desplazaban en conjunto poco menos de 120.000 toneladas, es decir, un peso similar al de un petrolero actual de tamaño mediano.

Cuando un buque era sometido a reparación, los trabajos no se limitaban solamente a los puentes, cámaras, palos y velas, como sucede con los cascos de acero, plástico, fibra de vidrio o aluminio de la actualidad. En el siglo XVIII el mantenimiento de un navío de guerra exigía la sustitución periódica de todos los elementos integrantes del casco: de hecho, las unidades que com-



3. SECCION del *Santísima Trinidad* en la que se aprecia la estructura y la distribución de la parte central del casco, limitada por los planos cuyas trazas vienen indicadas por las líneas de color rojo de la figura 2. La construcción empezaba con la colocación de la quilla, luego seguían las varengas, a continuación se ponían la sobrequilla y cuadernas, así como las cintas, durmientes y baos. Las provisiones para el viaje iban estibadas en la bodega principal. En el sollado se encontraban la enfermería y los pañoles donde se guardaban las cargas de pólvora. Los cañones de mayor calibre y peso iban montados en el primer puente, que se encontraba encima mismo del sollado. La tripulación, que se alojaba en el segundo y tercer puente, dormía en coys colgados.

batieron en Trafalgar no eran exactamente los mismos buques que habían sido construidos y botados. El sistema empleado para la reparación puede resultar familiar a los navegantes deportivos de hoy en día: una vez trasladada la artillería, se daban desde tierra unos aparejos a la arboladura con los que se tumbaba el navío a la banda y en esta posición se procedía al carenado. Entonces se sustituían las tablas podridas o, en caso de no ser necesario, limpiaban los fondos de incrustaciones y luego protegían con productos apropiados. Normalmente los fondos iban recubiertos con planchas de cobre para proteger la madera del teredo y de la putrefacción.

Todos estos trabajos de mantenimiento prolongaban en gran medida la vida de un barco: el *Santísima Trinidad* tenía 36 años cuando fue hundido en Trafalgar, y el *Victory*, navío insignia de Nelson, 40. Por otro lado, un buque con los fondos limpios navegaba mejor y rendía mejores servicios a su capitán. En estas condiciones, al estar libre de incrustaciones, como sucedía en los que llevaban los fondos forrados con planchas de cobre, andaba más y respondía mucho mejor, maniobrando más fácilmente para entrar en acción. De todos modos, las consecuencias del aumento de velocidad no eran siempre beneficiosas. En la batalla de Trafalgar, por ejemplo, el navío inglés *Royal Sovereign*, recién forrado con planchas de cobre, dejó por la popa las dos líneas de navíos ingleses y se enfrentó solo al navío español *Santa Ana*, de 112 cañones, y por tanto mucho más artillado que él, recibiendo unas andanadas de artillería que le causaron graves daños.

El coste del carenado era un factor decisivo en la economía de los estados marítimos europeos en época de guerra. Así, por ejemplo, el historiador José P. Merino Navarro, en su obra "La Armada Española en el s. XVIII" publicada por la Fundación Universitaria Española, de Madrid, dice que en 1763 la construcción del *Victory* costó 63.000 libras esterlinas, en tanto que los gastos de mantenimiento hasta el año 1815, en que finalizaron las guerras napoleónicas, ascendieron a 372.000 libras esterlinas. España, por la necesidad de proteger sus intereses tanto en América como en las islas Filipinas, tenía más centros de carenado y reparación repartidos por todo el mundo que los franceses e ingleses juntos, de modo que los navíos españoles se encontraban siempre en un estado de conservación muy superior al de sus enemigos. El almirante Lord Cuthbert Collingwood, uno de los grandes capitanes de la marina inglesa de aquella época, comunicó en más de una ocasión, tanto a Nelson como al Almirantazgo, el mal estado de conservación de los navíos de línea ingleses. Por este motivo, muchos historiadores de la marina han escrito que Inglaterra hubiera sido incapaz de combatir y vencer en otra batalla de Trafalgar, sin antes haber renovado las partes podridas de las unidades de la flota. De todos modos es probable que una reparación de esa importancia hubiera agotado totalmente los recursos financieros de la nación.

La renovación de la flota española en el siglo XVIII formó parte de la modernización de las instituciones que llevó a cabo Carlos III, uno de los monarcas del "despotismo ilustrado" de la época, quien introdujo nuevos métodos de planificación a largo plazo en toda la industria española, incluyendo los astilleros reales. Una de las mejoras más efectivas fue la normalización de los navíos de guerra. A principios del siglo XVIII cada navío respondía a un proyecto distinto. Sin embargo, en la década de 1770, los navíos empezaron a dividirse en seis clases o grupos, construyéndose los de cada uno de ellos de acuerdo con los mismos planos. Además, y aunque los proyectos de buques de distinta clase fueran diferentes, los cascos, estructuras de cubierta y aparejo vélico eran muy similares. El resultado de todo ello fue un espectacular incremento de la productividad de los astilleros, y precisamente en una época en que España necesitaba aumentar rápidamente la flota, a base de unidades nuevas con las que defender las colonias, tan distantes y codiciadas, durante el conflicto con Inglaterra.

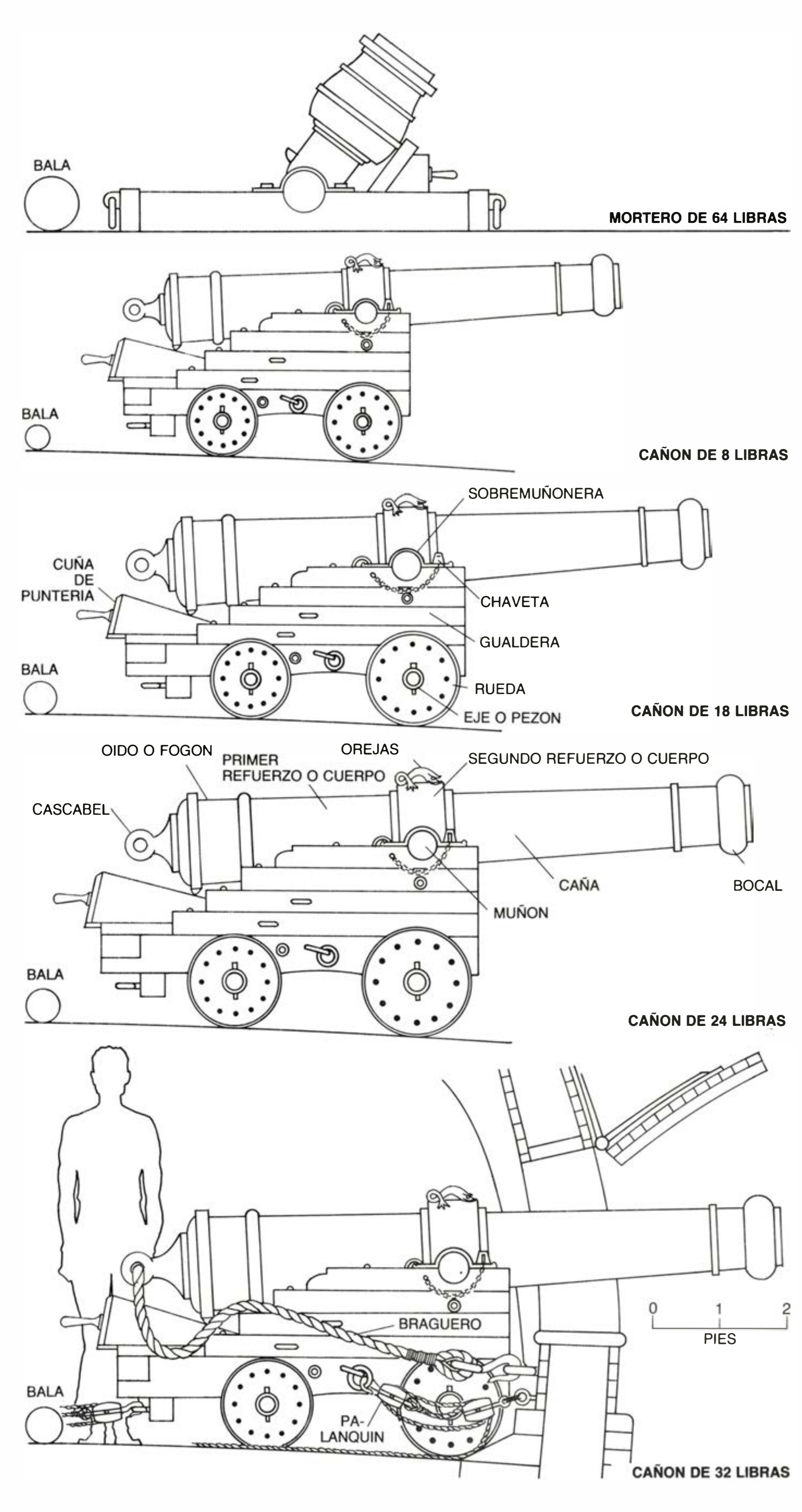
Cada uno de los seis proyectos fue el resultado de una solución de compromiso entre la necesidad de disponer de una plataforma flotante y estable donde montar los cañones y la capacidad de maniobrar con rapidez y desarrollar un buen andar a vela. La clasificación estaba basada en el número de puentes o cubiertas corridas y en el de cañones de cada buque. Los navíos de primera clase, como el *Santísima Trinidad*, eran los más grandes y de mayor porte. Este llegó a tener hasta 144 cañones, y fue el único de cuatro puentes, es decir, de otras tantas baterías corridas, que estuvo en servicio. Todos los demás de primera clase tenían sólo tres puentes. Los de segunda clase portaban de 80 a 98 cañones repartidos en tres puentes, y los de tercera clase, de 74 a 80 cañones en dos. Las unidades de estas tres primeras clases se designaban generalmente como navíos de línea.

Las unidades de la cuarta, quinta y sexta clase integraban normalmente las escuadras de crucero, pues el menor número de cañones lo compensaban con un mayor andar. Los de cuarta clase eran de dos puentes y llevaban un total de 50 a 60 cañones, en tanto que los de quinta clase eran de una sola cubierta y de 32 a 44 cañones; los de sexta clase eran también de un solo puente y del porte de 20 a 28 cañones. Estas últimas unidades eran las más veloces de la marina española y, por lo general, se empleaban para llevar correo y despachos reales entre España y las colonias.

El puntal o altura de un navío español, medida desde la quilla hasta la cubierta superior, era similar a la de una casa de cinco pisos. En un navío típico de primera clase, la bodega principal iba encima del plan y a continuación venía el sollado. Las tres cubiertas donde iba la artillería se denominaban simplemente, de abajo arriba, primer, segundo y tercer puente o batería. Con mal tiempo, y por efecto del peso de los cañones, el buque balanceaba con exceso, y en tales condiciones era muy frecuente, principalmente en los navíos ingleses, que bebieran agua por las portas de la primera batería.

El sollado era la cubierta más resguardada de a bordo y en ella se encontraba la enfermería, donde el cirujano curaba los heridos y practicaba las amputaciones a que daban lugar las sangrientas batallas navales. Por esta razón los navíos ingleses solían llevar el sollado pintado de rojo, pues así los regueros de sangre procedentes de la mesa del cirujano eran menos visibles. En el *Santísima Trinidad* había un crucifijo colgado del mamparo próximo a aquella mesa, símbolo de la fe por la que muchos hombres daban un brazo, una pierna o la propia vida. En el sollado se encontraban también los pañoles donde se guardaban las cargas de pólvora listas para ser utilizadas.

Con el fin de reducir la tendencia del buque a balancear, el casco de los navíos españoles era más mangudo a la altura de la primera batería que en el segundo y tercer puente. Por cuestiones de estabilidad los cañones de más calibre de a bordo, cada uno de los cuales tenía unos tres metros de largo y disparaba proyectiles de 32 libras, iban en el primer puente. El *Santísima Trinidad* portaba 30 cañones de este calibre, 15 a cada banda. A corta distancia un proyectil podía atravesar una pieza de roble de 90 centímetros de grueso, aunque de hecho los mayores daños los



4. CAÑONES Y MORTEROS de un navío de guerra del siglo XVIII. El *Santísima Trinidad* llevaba en el primer puente, o batería principal, 30 cañones de 32 libras y que se designaban así por razón del peso de la bala que normalmente empleaban. Los cañones de 32 libras eran los de mayor calibre que utilizaban las marinas a fines del siglo XVIII; tenían unos 3 metros de largo y podían alcanzar un blanco situado a una milla y media de distancia. El *Santísima Trinidad* llevaba en el segundo puente una batería de 32 piezas de 24 libras y en el tercero 32 piezas de 18 libras y 26 de 8 libras, además de morteros. Al ser remontado con un puente más, el número de cañones pasó de 120 a 144. Los aparejos empleados para poner los cañones en batería son los que aparecen representados, de una forma esquemática, en el cañón de 32 libras.

producía disparando balas encadenadas. Este mismo cañón podía alcanzar un blanco situado a una milla y media de distancia.

El segundo y tercer puentes, además de llevar artillería, servían de alojamiento a la dotación, durmiendo la gente en coys colgados de los baos y que estibaban en las batayolas antes del inicio del combate. La cocina estaba situada en el centro del buque y consistía en un simple fogón donde la tripulación podía cocer comida o hervir agua. Los navíos españoles adolecían de llevar un exceso de dotación, pues empleaban una táctica que exigía el concurso de mucha gente, y como la mayoría era inexperta, resultaban difícilmente manejables. En la batalla de Trafalgar el *Santísima Trinidad* llevaba 1200 hombres, muchos convalecientes aún de las epidemias de cólera y malaria que afectaron al sur de España entre 1802 y 1804. En cambio, el navío inglés de primera clase *Victory*, cuya tripulación era igualmente excesiva, llevaba solamente 900 hombres, aunque muy expertos.

A bordo de los navíos españoles los alojamientos de los jefes estaban espléndidamente decorados, lo que era un fiel reflejo de la estructura jerárquica de la sociedad. Cada oficial tenía su propio camarote, donde vivía y comía con la misma comodidad que solía hacerlo en tierra. En la mesa de la cámara de popa no faltaban jamás la buena comida ni el buen vino, en tanto que los cajones y estantes de los muebles estaban llenos de porcelana, botellas de vino y cartas náuticas. Todo este lujo quedaba normalmente destrozado en el combate, y más teniendo en cuenta la táctica inglesa de disparar las andanadas a la popa del navío enemigo.

El hecho de que la dotación de un buque fuera muy numerosa se justifica perfectamente, pues aún en época de paz todos los trabajos necesarios para el manejo debían realizarse a mano. Al inicio del viaje, todo lo que se encontraba a bordo, incluyendo los pertrechos, munición, provisiones y aún los pesados cañones había que estibarlos o instalarlos a base del esfuerzo muscular. Luego, cuando el buque estaba navegando, los marineros debían subir a menudo a la arboladura para aferrar o largar cada una de las velas. Las bombas instaladas en el segundo puente y destinadas a achicar el agua de las sentinas había que manejarlas a mano, y durante el combate era preciso mantener en funcionamiento otras bombas suplementarias para apagar incendios y limpiar las cubiertas de sangre. Tanto la motonería como los cabrestantes em-

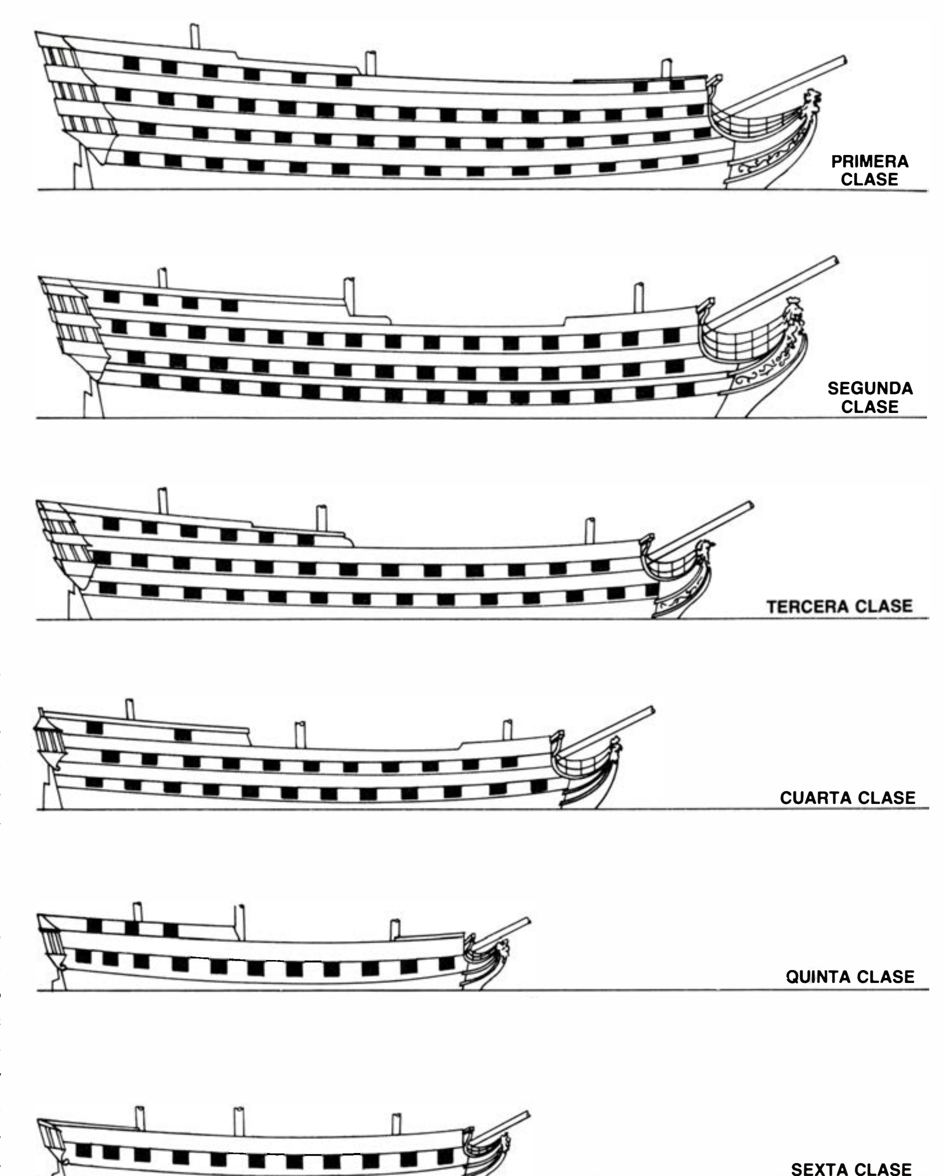
pleados para levar las anclas y manejar las velas principales aliviaban algo el trabajo, pero de todos modos tanto aquélla como éstos eran de funcionamiento manual.

Al contrario de los ingleses, franceses y españoles consideraban los navíos de guerra como simples plataformas para llevar soldados y cañones, y si a ello unimos el hecho de que la dotación era normalmente inexperta, tendremos la explicación de la derrota que sufrieron en Trafalgar. En principio, la táctica de los capitanes españoles era disparar contra el aparejo de los navíos enemigos al objeto de rendirles la arboladura, y seguidamente, una vez conseguido, abordarlos y apresarlos tras un cruento combate cuerpo a cuerpo.

En cambio, la táctica inglesa era disparar contra el casco del navío enemigo. Además, y como los ingleses empleaban unos buques muy balanceros, se adelantaron a los españoles en la sustitución de la llama por la chispa en el disparo de las armas, lo que producía instantáneamente la ignición de la carga, y así las probabilidades de apuntar y hacer fuego antes de que el navío iniciara el balance eran muy superiores.

En cualquier caso, en el siglo XVIII los planes de batalla se hacían teniendo en cuenta que la eficacia de las andanadas de un navío de guerra era más notable a corta distancia. Por esta razón, cuando un navío maniobraba hábilmente y lograba colocarse a popa de otro, le bastaba una simple descarga de las piezas de 32 libras para destruir completamente aquella parte del buque enemigo, pues a pesar de ir espléndidamente decorada la protección era muy escasa. Además, los proyectiles barrían completamente el puente del navío enemigo, destrozando los cañones y desprendiendo millares de astillas de madera que se convertían a su vez en armas realmente mortíferas.

Cuando en el transcurso del combate dos buques enemigos quedaban abarloados, se hacía recular inmediatamente los cañones, de modo que las bocas quedaran dentro, para dispararlos desde esta posición y producir la destrucción de los costados. En estas condiciones el entrepuente, de escasamente 1,80 metros de alto, hacía de caja de resonancia y convertía el ruido de cada disparo en un estruendo que dejaba completamente sorda a la gente. Cuando se cargaban con balas calentadas al rojo era necesario el empleo de herramientas a propósito y, al cabo de unos disparos, los cañones alcanzaban una temperatura suficiente para producir dolorosas quemaduras a quienes los manejaban y se encargaban de ponerlos en batería. Además, en el entrepuente, lleno con la humareda producida por los disparos, la visión era casi nula y muchos artilleros morían aplastados a causa del cejo o retroceso de las piezas.



5. CLASIFICACION DE LOS NAVIOS en función de número de cañones y de puentes. Los de primera clase eran los navíos de guerra más artillados y la mayoría de ellos llevaban de 80 a 110 cañones distribuidos en tres puentes. En los de segunda clase, el número de puentes era igualmente de tres, aunque el de cañones estaba comprendido entre 80 y 98; en cambio, los de tercera clase eran del porte de 74 a 80 cañones, repartidos en dos puentes. La denominación de navíos de línea se aplicaba a los de primera, segunda y tercera clase. Los de cuarta, quinta y sexta clase eran más ligeros y andaban más; se utilizaban como cruceros o correos. Los de cuarta clase montaban de 50 a 60 cañones en dos puentes; los de quinta clase tenían de 32 a 44 cañones en un puente y los de sexta clase de 20 a 28 cañones, en un solo puente.

No obstante, los navíos eran capaces de mantener el combate a corta distancia durante varias horas. El *Santísima Trinidad*, por ejemplo, navío insignia del bloqueo español de Gibraltar entre 1779 y 1782, intervino en la batalla naval de cabo San Vicente en 1797 y luego en la de Trafalgar. Las andanadas de dos y tres proyectiles por cañón no consiguieron hundirlo. Y aunque los ingleses obtuvieron la victoria, muchos de los navíos fueron seriamente dañados por el fuego de los españoles.

Al hablar del navío español, sería injusto no mencionar el papel que desempeñó en los viajes de descubrimiento y exploración. Los viajes científicos organizados en época de Carlos III circumnavegaron el globo y, desde el punto de vista científico, fueron tan provechosos como los realizados por los ingleses James Cook y George Vancouver, aunque éstos sean mucho más conocidos. Los expedicionarios españoles hicieron estudios de biología marina, oceanografía y técnica de navegación. Los capitanes, botánicos, geógrafos y cartógrafos que participaron en

ellos redactaron informes muy detallados de todas las observaciones.

Además, los capitanes españoles eran algo más que simples militares. Dos de los 18 que participaron en Trafalgar figuraban entre los mejores navegantes, exploradores, cartógrafos y matemáticos de la época: Dionisio Alcalá Galiano fue un gran navegante y dio nombre a diversos lugares de las costas de Chile y del oeste del Canadá. El brigadier Cosme Damián Churruca, de origen vasco, escribió varias obras para la marina, exploró la costa occidental de América del Sur e hizo importantes contribuciones matemáticas.

Observaciones sobre el *Santísima Trinidad*

En el interesante artículo que dedica al navío de línea español, el autor, John D. Harbron, se hace eco de la admiración que despertó en la época el *Santísima Trinidad*. En realidad, los principales admiradores del navío fueron los enemigos de la España de aquel entonces, y la única razón de ello era el hecho de ser el más artillado y el único de cuatro puentes que ha existido, lo que hacía de él una presa en extremo codiciada.

No obstante, las fuentes españolas cuando se refieren al *Santísima Trinidad* lo hacen de forma muy distinta, aunque todas coinciden en señalar su poca eficacia, como consecuencia de los defectos estructurales y malas cualidades marineras que le acompañaron a lo largo de toda su vida, pese a todos los costosos intentos de subsanarlos.

Como datos particulares cabe destacar que el *Santísima Trinidad* fue construido por Mateo Mullan en el Astillero de La Habana en 1769 y sus dimensiones principales, en pies de Burgos (y metros), eran las siguientes:

eslora, $213\frac{2}{3}$ (59,54); quilla, $182\frac{5}{12}$ (50,83);
manga, $57\frac{3}{4}$ (16,09); puntal, $28\frac{11}{12}$ (8,06).

Originariamente se trataba de un navío de tres puentes y aunque algunas fuentes lo dan con el porte de 112, 116 o 118, cañones, lo cierto es que la opinión más difundida le atribuye 120, repartidos del modo que se indica seguidamente: 30 cañones de 36 libras; 32 de 24; 32 de 18 y 26 de 8.

En 1770, a su llegada a El Ferrol para ser artillado, fue sometido a diversas pruebas y se le apreciaron varios defectos. Por esta razón fue reformado en 1771, en el sentido de incrementarle en 8 pulgadas el ancho de la pala del timón, en tanto que se le reducía de 37° a 33° la graduación del bauprés.

Posteriormente se observó que el navío adolecía de una falta de estabilidad y por tal motivo escoraba con exceso aún con vientos bonancibles, de modo que la primera batería quedaba inservible. Como consecuencia de ello, en 1778 se le dotó de una falsa quilla o zapata de 12 pulgadas de grueso a popa y 3 a proa, al mismo tiempo que se le rebajaba la altura de los entrepuentes las cantidades siguientes: 10 pulgadas entre la 1.ª y 2.ª cubiertas; 8 entre la 2.ª y 3.ª y 6 entre la 3.ª y el alcázar.

A pesar de esta obra, no se consiguió corregir el defecto del exceso de inclinación, por lo que de nuevo fue reformado en Cádiz en 1795, hasta dejarlo con las dimensiones, en pies de Burgos (y metros), siguientes:

eslora, $220\frac{1}{2}$ (61,44); quilla, 186 (51,83);
manga, $58\frac{1}{3}$ (16,25); puntal, $28\frac{3}{4}$ (8,01).

Al mismo tiempo se le aumentó la artillería hasta las 134 piezas que se indican a continuación: 36 cañones de 32 libras; 34 de 24; 36 de 12; 18 de 8 y 10 obuses de 24.

Posteriormente, al ser reparado el *Santísima Trinidad* de los daños sufridos en el combate de cabo San Vicente (1797) y como la falta de estabilidad no se había solucionado aún, se optó por embonar el casco, y, lamentablemente, se aprovechó la circunstancia para correrle la cuarta batería. Así en 1799 llevaba en total las 136 piezas que se indican a continuación: 32 cañones de 36 libras; 34 de 24; 36 de 12; 18 de 8; 10 obuses de 24 libras y 6 esmeriles.

Luego, algo antes del combate de Trafalgar, se le montaron otros cuatro obuses en la cubierta alta, con lo que pasó a llevar 140 cañones.

De todos modos, ninguna de las reformas logró convertirlo en un buen navío, pues desde el punto de vista marinero viró siempre muy mal y la ejecución de cualquier maniobra resultaba difícil, pesada y lenta. (Laureano Carbonell Relat, Director del Museo Marítimo de la Diputación de Barcelona.)

Juegos de ordenador

Tiburones y peces libran una guerra ecológica en el planeta Acua-Tor

A. K. Dewdney

En lontananza, mirando en dirección que sólo cabe llamar recreativa, a distancia limitada únicamente por la osadía y pericia de cada cual como programador, nada entre las estrellas el planeta Acua-Tor. Su forma es toroidal, es decir, semejante a una rosquilla, y está enteramente cubierto de agua. Las dos especies dominantes en Acua-Tor son tiburones y peces, así llamados por ser éstas las criaturas terrestres que más se les asemejan. Los tiburones de Acua-Tor se nutren de los peces, que depredan y de los que parece haber siempre abundante provisión.

Este simplista esquema ecológico podría parecer estable y aún soporífico, si no fuera porque las poblaciones de peces y tiburones experimentan violentas fluctuaciones. Muchas veces estuvo en tiempos pasados a punto de ser devorada la población de peces, mientras que en otras ocasiones los tiburones casi llegaron a extinguirse por completo (a pesar de la abundancia de peces). Empero, tanto tiburones como peces sobreviven aún. Buscando descubrir por qué, concebí la idea de un programa que simulase sus actividades tróficas y reproductoras.

No obstante, antes de contemplar esos ritmos ecológicos en la pantalla de visualización [*véanse las figuras 1 y 2*] hube de dedicar no poco tiempo a meditar sobre las reglas y detalles del programa ACUA-TOR. Un día, de sobremesa, me encontré pensando a media voz frente a David Wiseman, el mago especialista en sistemas de mi departamento de la Universidad de Ontario Occidental. Cuando le hube explicado el proyecto, Magi (así le llamamos) sonreía enigmáticamente. Al día siguiente, por la mañana, me invitaba ufano a ver en su oficina un sistema en funcionamiento.

"Fíjate", me dijo, y pulsó una tecla. Un surtido inicialmente aleatorio de peces y tiburones revoloteaba lentamente de uno a otro lugar, caóticamente, al parecer. Algunos tiburones no lograban alimentarse, y desaparecían. Otros generaban progenie, tan voraz como ellos mismos. Unos cuantos peces, lo bastante afortunados para ocupar temporalmente una región libre de tiburones, proliferaron y se multiplicaron hasta formar un notable cardumen. Poco después, algunos tiburones descubrieron el banco de peces, se congregaron en sus bordes y avanzaron un breve trecho, abriéndose paso a dentelladas. Algunos minutos más tarde, el resumen estadístico que presentaba la pantalla de Magi nos daba cuenta de la situación: 578 peces frente a sólo 68 tiburones.

Alguien entró en el despacho de Magi y volvió a salir corriendo. Antes de cinco minutos su despacho estaba atiborrado de gente que jaleaba a los tiburones. Lentamente, una pared de escualos fue cerrándose sobre los desventurados peces. En otra región de la pantalla, un reducido banco de peces medraba, desapercibido. Las exclamaciones subieron de punto cuando el gran cardumen acabó devorado, mientras los tiburones iban uno tras otro muriendo de inanición, arremolinándose y merodeando en busca de presas. Pensé en cambiar las reglas y permitir que los tiburones se devorasen unos a otros, pero comprendí que un tal festín no serviría para prolongar significativamente su existencia, pudiendo, en cambio, comprometer las fases iniciales del otro pequeño banco. Cuando por fin dos tiburones se toparon con él en su merodeo, el ciclo recomenzó.

El programa para el Acua-Tor no es muy largo ni de difícil redacción. Los lectores que dispongan de ordenador personal, aunque tengan reducida experiencia como programadores, encontrarán remuneradora la empresa cuando por fin tengan escritos los códigos, los hayan depurado y los vean funcionar. Antes de cada pasada pueden ajustarse parámetros tales como tiempos de cría, períodos de hambruna y tamaño de las poblaciones iniciales. Lo único que resta entonces es arrellanarse y observar cómo en la mezcolanza desordenada de peces y tiburones comienzan lentamente a crearse pautas ecológicas.

El programa ACUA-TOR lleva incorporado cierto número de reglas sencillas que gobiernan las conductas de peces y tiburones. Las criaturas nadan en un océano rectangular cuadriculado, cuyos lados opuestos están identificados dos a dos. Significa esto, simplemente, que si un pez o tiburón ocupa un punto situado en el borde derecho, y opta por nadar hacia el este (hacia la derecha), reaparecerá en el correspondiente lugar del borde izquierdo. Igual relación es válida para los bordes superior e inferior. El espacio bidimensional así resultante es en realidad un toro, que es la auténtica superficie de ACUA-TOR [*véase la figura 3*]. Quienquiera se decida a redactar su programa ACUA-TOR puede determinar el tamaño más adecuado de la cuadrícula oceánica. Magi, cuyo programa funciona en un ordenador VAX, ha preparado un océano de 80 puntos de ancho y 23 de alto. Mi propia versión de ACUA-TOR, para un IBM PC, se vale de un océano mucho más modesto: 32 por 14.

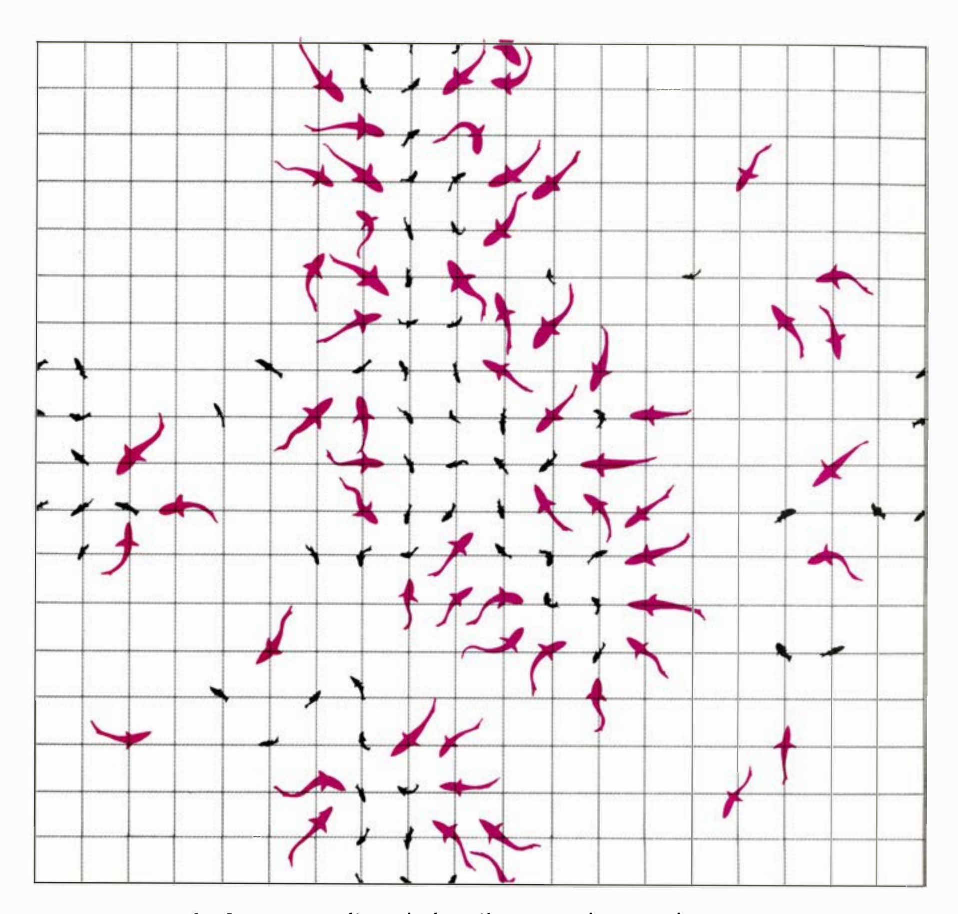
El tiempo transcurre a saltos discretos, que llamaré cronones. En cada cronón, peces y tiburones pueden desplazarse hacia el norte, sur, este y oeste, trasladándose a un punto adyacente, siempre que no esté ocupado ya por otro miembro de su misma especie. La decisión concreta queda a cargo de un generador de números aleatorios. Para los peces, la elección es sencilla: han de tomar al azar alguna de las casillas adyacentes disponibles y trasladarse a ella. Si los cuatro puntos adyacentes están ocupados, el pez permanece inmóvil. Para los tiburones la regla es un poco más complicada, pues la depredación tiene prioridad sobre el mero desplazamiento: de entre los puntos adyacentes ocupados por peces, se se-

lecciona uno al azar y, trasladándose allí, el tiburón devora al pez. Si no hay peces vecinos, el tiburón se mueve exactamente igual que los peces, eludiendo a sus congéneres.

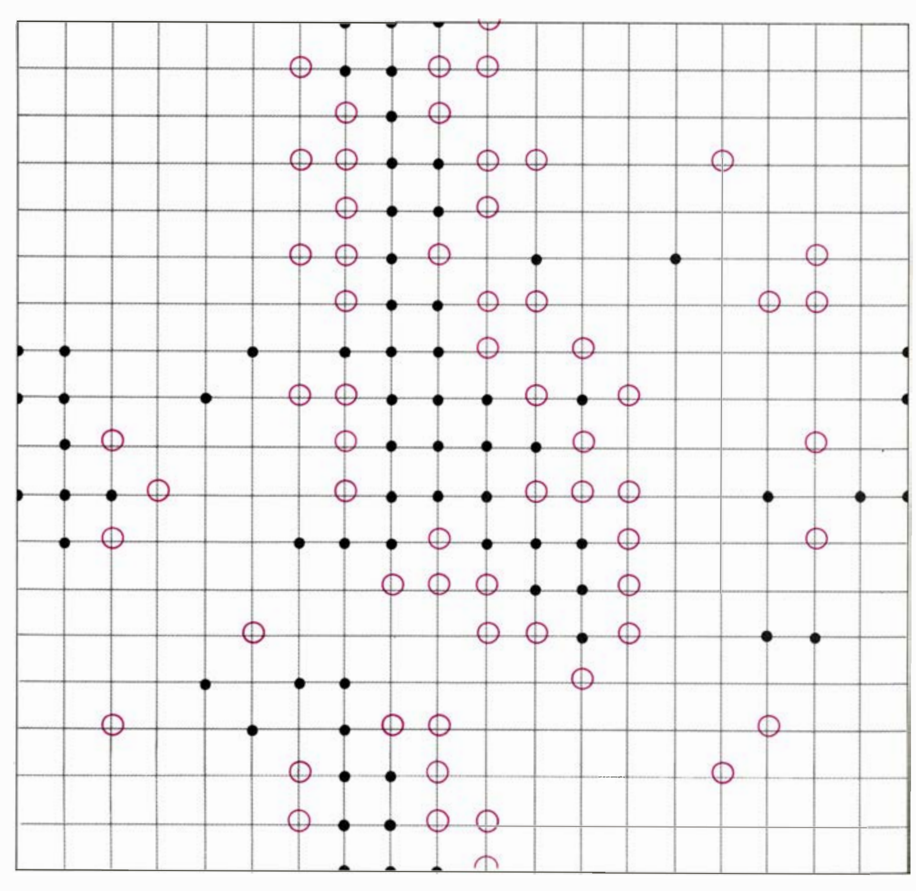
El creador de ACUA-TOR selecciona cinco parámetros, a fin de definir una determinada simulación. Los parámetros *npeces* y *nescualos* representan los números de peces y tiburones al comienzo de cada pasada. El programa distribuye al azar, más o menos uniformemente sobre la superficie del planeta, los números prefijados de peces y tiburones. Los parámetros *pcría* y *tcría* designan los números de cronones que han de sobrevivir peces y tiburones para engendrar una única cría. (Según parece, ambas especies son partenogenéticas.) Finalmente, la variable *ayuno* especifica el número de cronones que puede sobrevivir un tiburón sin hallar comida. Si merodea más de lo estipulado sin echarse nada al coleto, muere, se hunde y desaparece. Durante cada cronón, el programa ACUA-TOR mueve una vez a cada pez y a cada escualo, y muestra en la pantalla el resultado. No son precisas reglas más complicadas que éstas para observar cómo la ecología de ACUA-TOR va a trompicones de una a otra crisis.

Magi y yo hemos observado cierto número de situaciones gobernadas por esos cinco parámetros, donde el océano de ACUA-TOR se sobrepoblaba de peces, con la consiguiente multiplicación de los tiburones, hasta el extremo de devorar a todos los peces y luego morir ellos. En otras ocasiones hemos visto devorar a todos los peces de un gran cardumen. Los tiburones, tras haberse dado el hartazgo, acabaron muriendo, incapaces de dar con otros bancos cercanos. En unas cuantas ocasiones hemos visto sostenerse la relación entre pez y depredador durante dos, y aun tres ciclos, antes de producirse el definitivo hundimiento de la población de escualos. Por otra parte, en los parámetros determinantes de estas situaciones nada nos daba la menor indicación acerca de cuáles serían las características capaces de garantizar un sistema ecológico de duración indefinida. ¿Cómo habían logrado sobrevivir las especies acuatorianas?

Se ha dicho que la biología es destino. Magi y yo estamos tentados de afirmar que la ecología es geometría, al menos por lo que a ACUA-TOR se refiere. La suerte final de cada escenario no parece depender de la aleatoriedad de la distribución inicial de los números de peces y de tiburones. Parece, por el

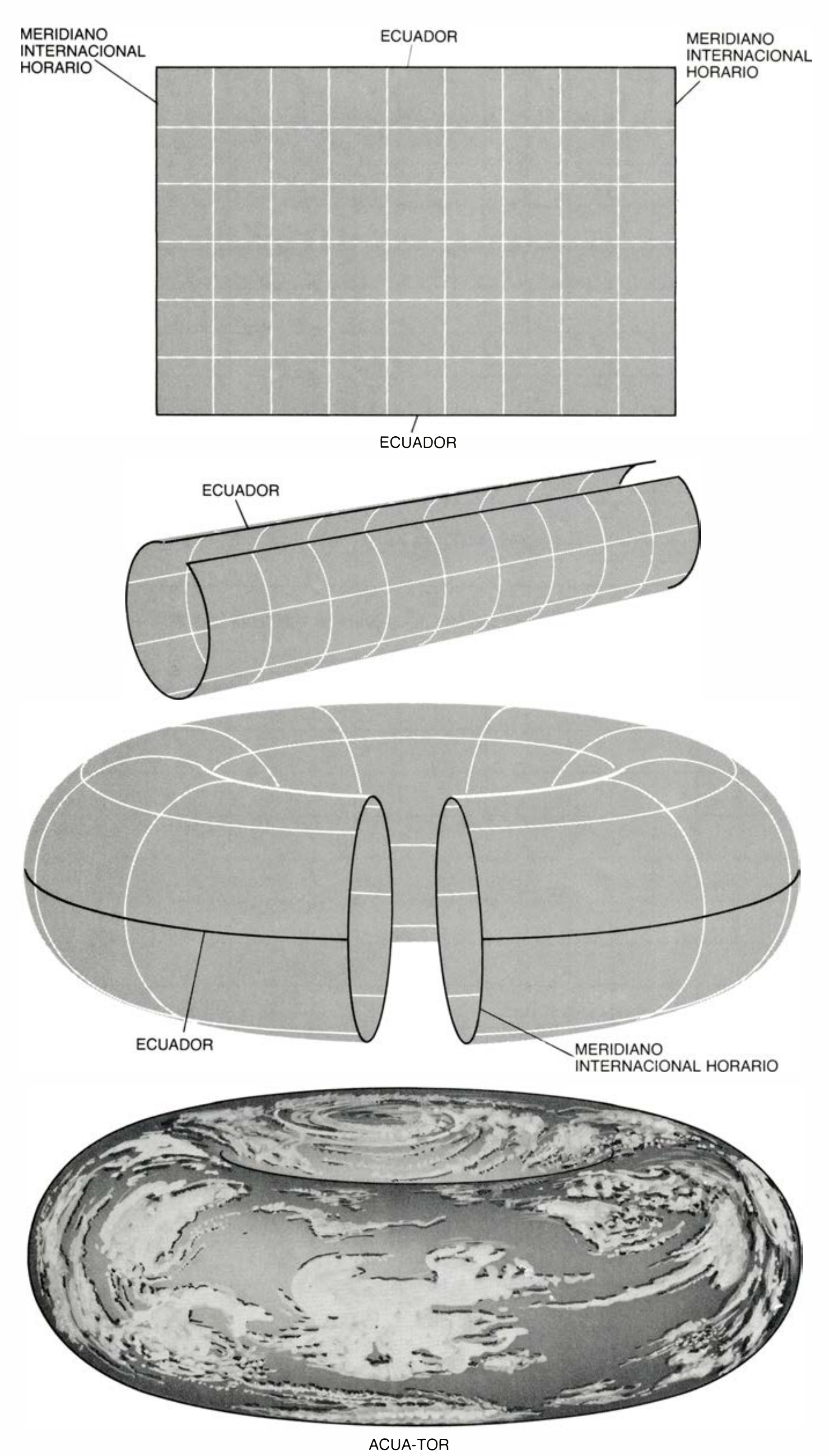


1. Imagen realista de los tiburones devorando peces



2. Una imagen de programación más sencilla. Los círculos representan tiburones y, los puntos, peces

contrario, que la verosimilitud del hundimiento final de la población se ajusta mucho más de cerca a la organización geométrica que se manifiesta en nuestras pantallas: cuanto más altamente organizada y localizada se encuentre cada población, tanto más verosímil es que se produzca una catástrofe en su ecología. Al meditar en este tema nos vimos llevados a conjeturar cómo podríamos elegir los valores de los cinco parámetros, de modo tendente a romper tal estructura. Nos llegó entonces un relámpago de inspiración: si los tiburones llegaran a concentrarse en los bordes de un banco de peces, para romper la estructura geométrica resultante podría ordenarse que los tiburones se reprodujeran menos frecuentemente. Después de todo, la propia congregación resultaba ser consecuencia más de la reproducción que del movimiento.



3. El planeta toroidal Acua-Tor y su representación sobre un mapa plano (o la pantalla de un ordenador)

Antes de que esta hipótesis tomara cuerpo, habíamos elegido tiempos de reproducción sensiblemente iguales para peces y tiburones. Creíamos que tasas reproductoras similares producirían poblaciones equilibradas. Seguramente muchas de las calamidades del mundo tecnológico de hoy sean consecuencia de vagos prejuicios de este mismo tipo. Sea como fuere, situé en mi océano de 32 por 14 doscientos peces y veinte tiburones; y establecí que los peces se reprodujeran cada tres cronones, prohibiendo en cambio que los escualos lo hicieran antes de transcurridos diez. Al cabo de quince minutos de observar el funcionamiento de mi programa (sin duda bastante lento), fuimos recompensados con la casi total recuperación de la inicial caída de población. La organización geométrica, aunque todavía existente, era mera sugerencia. Los cardúmenes de peces adoptaban la forma de conglomerados imprecisos, de bordes desgarrados y, en ciertas zonas de la pantalla, tiburones y peces se entreveraban, más o menos al azar.

Dejé en funcionamiento el programa toda la tarde, alzando ocasionalmente la vista de cuestiones más importantes desde mi mesa de trabajo. El programa siguió funcionando toda la noche, y cuando visité de nuevo mi despacho, tras la clase matinal, encontré que tiburones y peces continuaban en su cíclica existencia. ¡Aquí estaba Acua-Tor!

Hay muchas maneras de llevar a la práctica un programa ACUA-TOR; pero tal vez la más sencilla consista en utilizar cierto número de tablas o matrices bidimensionales. Yo suelo emplear cinco, que llamo PECES, ESCUALOS, MUEVEPECES, MUEVESCUALOS e INANICION. Estas tablas, todas de 32 por 14, llevan la cuenta y control de las edades de peces y tiburones. Concretamente, PECES (I, J) denota la presencia o ausencia de un pez en el punto de coordenadas (I, J). En ausencia de peces, tal posición tiene el valor −1. De haber alguno, contiene un asiento con la edad en cronones del pez ocupante. Un esquema idéntico se utiliza para la tabla ESCUALOS, que se ocupa del control de edades y posiciones de los tiburones. La tabla MUE-

VEPECES contiene en cada casilla un registro de si algún pez ha sido llevado allí durante el ciclo de cómputo en curso. Tal registro evita que el programa mueva dos veces el mismo pez durante un mismo cronón. MUEVESCUALOS lleva a cabo idéntica tarea para los tiburones. La tabla llamada INANICION registra cuál fue la última ocasión en que cada tiburón logró alimentarse. Cuando en la casilla correspondiente no hay tiburón, se le da el valor -1.

La forma más sencilla de presentar lo que en ACUA-TOR acontece es mostrar en la pantalla una línea de caracteres para cada hilera de las tablas. Cuando una posición está en blanco, ello denota que se encuentra vacante el puesto correspondiente. Los puntos (.) representan peces y, los ceros (0), tiburones. Aunque esta presentación parezca muy limitada, resulta sorprendentemente informativa y grata de contemplar.

En la fase inicial de ACUA-TOR, los números requeridos de peces y tiburones se esparcen uniformemente sobre un oceáno de forma tórica. El programa ejecuta entonces cíclicamente los tres segmentos o subprogramas que se describen a renglón seguido. Cada ciclo completo del programa equivale al tiempo de un cronón.

PECES: NATACION Y REPRODUCCION.
Para cada uno de los peces de la tabla PECES, el programa prepara una lista de posiciones desocupadas adyacentes, y traslada el pez hasta una de ellas, elegida al azar. Por tanto, en la antigua posición de PECES habrá de inscribirse un -1 y, en la nueva, la edad actual del pez. La tabla MUEVEPECES ha de actualizarse igualmente según acabamos de explicar. Cuando la edad del pez es igual a *pcría*, el programa sitúa otro pez en la posición primitiva, y les asigna a ambos la edad 0. Como antes, MUEVEPECES toma nota del nuevo pez. Si todas las posiciones adyacentes estuvieran ocupadas, el pez no se movería ni procrearía.

TIBURONES: CAZA Y REPRODUCCION.
Para cada uno de los tiburones de la tabla correspondiente, el programa prepara una lista de posiciones contiguas ocupadas por peces (si las hay). El tiburón elige al azar una de ellas, se dirige allí y devora el pez. Así pues, el programa deberá actualizar las tablas de ESCUALOS y MUEVESCUALOS, como ya hizo con PECES y MUEVEPECES, y además asignar el valor -1 a la correspondiente posición de la tabla PECES. Asimismo, ha de poner a 0 esa misma posición en la tabla INANICION. Cuando no hay peces adyacentes, los tiburones se mueven igual que los peces. Si la edad de un tiburón alcanza cuando menos la de *tcría*, se engendra un nuevo tiburón, como ocurre con los peces.

PRESENTACION:
El programa inspecciona las matrices de PECES y ESCUALOS; presenta un punto para cada pez y un 0 para cada tiburón. La presentación puede ser simultánea, o puede hacerse en dos partes: una después de mover los peces y, otra, después de la traslación de los tiburones.

Para poblar el océano inicial, el programador construye un bucle con el que genera *npeces* parejas de números aleatorios. Tales números deberán ajustarse a las dimensiones horizontal y vertical del océano que elija. En cada una de las posiciones aleatorias así seleccionadas, el programa sitúa un pez en la tabla PECES, asignándole también al azar una edad comprendida entre 0 y *pcría*. La distribución de tiburones sigue un método análogo. En ambos casos, es preciso comprobar antes si la posición elegida está ocupada ya. Esta asignación aleatoria de edades a peces y a tiburones tiene por efecto que su reproducción se efectúe también al azar, de modo natural. De no ser por esta precaución, veríamos cómo peces y tiburones duplicaban súbitamente su número, lo que produciría una sensación tan desconcertante como poco natural.

Tal vez haya programadores noveles para quienes la descripción anterior resulte demasiado general y no se hagan idea clara de cómo redactar un programa ACUA-TOR. Tales programadores podrían comenzar preparando lo que se conoce por programa del borracho, que al caminar vacila y se tambalea. Tal programa podría consistir en un único bucle (del tipo "haz-mientras", por ejemplo), que consta de siete instrucciones. Las hemos escrito aquí en lenguaje algorítmico, que no prejuzga ningún lenguaje de programación específico. Las asignaciones de valor están indicadas por flechas que apuntan hacia la izquierda; las variables X e Y son las coordenadas del vacilante beodo, y van modificándose de acuerdo con el entero aleatorio que le esté asignado a la variable *dirección*. Según este entero sea 0, 1, 2 o 3, el borracho (un punto de la pantalla) se mueve al norte, al este, al sur, o al oeste.

dirección $\leftarrow$ parte entera
  de ($azar \times 4$)
si *dirección* $= 0$ entonces $X \leftarrow X + 1$
si *dirección* $= 1$ entonces $X \leftarrow X - 1$
si *dirección* $= 2$ entonces $Y \leftarrow Y + 1$
si *dirección* $= 3$ entonces $Y \leftarrow Y - 1$
presentar (X, Y)

Si nuestro generador particular de números aleatorios engendra un número decimal, llamado *azar*, comprendido entre 0 y 1, este algoritmo ajusta el margen de valores aleatorios desde 0 hasta 0,999. La parte entera del número resultante será entonces 0, 1, 2 o 3.

No insinúo que observar por la pantalla de un monitor los minúsculos desplazamientos de un punto luminoso sea lo mismo que el drama ecológico que protagonizan tiburones y peces, pero la redacción de este programa sí nos facilita la comprensión de cómo podrían construirse las secciones de ACUA-TOR.

A los programadores expertos que lean esta sección se les ocurrirán sin duda otros métodos para redactar el programa ACUA-TOR. Puede reducirse notablemente el volumen de datos a procesar utilizando listas encadenadas para el seguimiento de peces y tiburones. Con tal estructura de datos, el tiempo requerido para cada ciclo de cómputo es proporcional al número de peces y tiburones presentes, y no al tamaño del océano.

ACUA-TOR puede proporcionarnos cierta comprensión de las poblaciones animales de aquí, en la Tierra. Sabemos que las poblaciones pequeñas afrontan elevada probabilidad de extinción, y que, aún en el caso de que ni presa ni predador lleguen a extinguirse, es casi seguro que sufrirán fluctuaciones en su número. En ecosistemas sencillos, de tipo depredador-presa, sus poblaciones experimentan dos ciclos superpuestos de máximos y mínimos de población. Los tamaños de las poblaciones de liebres mímicas y de linces registrados desde 1847 hasta 1903 en la región subártica canadiense se ajustan a esta pauta [*véase la figura 4*]. Tales cifras dan el número de ejemplares de cada especie atrapados durante el correspondiene período de un año. Es de presumir que los valores sean proporcionales a los tamaños auténticos de las poblaciones. Si lo fueran, los ciclos se explicarían fácilmente como consecuencia de que los linces medran y pro-

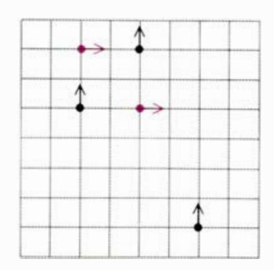
liferan a expensas de una población de liebres en crecimiento, pero cuyo declive comienza conforme aumenta el número de los linces. Pronto empieza a escasear la comida de los linces, y éstos van muriendo de inanición, o se reproducen menos, o ambas cosas. Al reducirse el número de linces, las liebres comienzan, nuevamente, a multiplicarse.

Para compararlas con este gráfico tenemos un juego de curvas lisas que representan una solución de las ecuaciones de Lotke-Volterra, formuladas por primera vez por V. Volterra, un matemático italiano, en 1931. En ellas se supone lo que podríamos llamar un depredador "continuo", permanentemente en busca de una presa, también continua. Las soluciones de estas ecuaciones exhiben una variación cíclica que, a primera vista, parecen reflejar los datos empíricos correspondientes a liebres y linces. No obstante, los biólogos no están de acuerdo con que las cifras de liebres y linces se expliquen con tan sencillo razonamiento. Pues, para empezar, intervienen al menos otros dos depredadores de liebres, a saber, los microbios y el hombre.

Por otra parte, la recopilación de estadísticas sobre tiburones y peces de Acua-Tor tiene pleno sentido, y así lo hemos hecho Magi y yo. Nuestros recientes gráficos de las poblaciones de peces y tiburones tienden a parecerse más a la de linces y liebres que las soluciones de la ecuación de Lotke-Volterra. Seguimos, no obstante, intrigados por la inestabilidad que muestran a largo plazo ciertas combinaciones de parámetros. Tal vez algún lector, trabajando con un programa ACUA-TOR propio, proporcione alguna luz. ¿Existe algún tipo de regla general por la que podamos predecir, dada una cierta combinación de parámetros, si el sistema ecológico resultante será estable? ¿En qué medida se ajustan las fluctuaciones cíclicas a lo previsto en las ecuaciones de Lotke-Volterra?

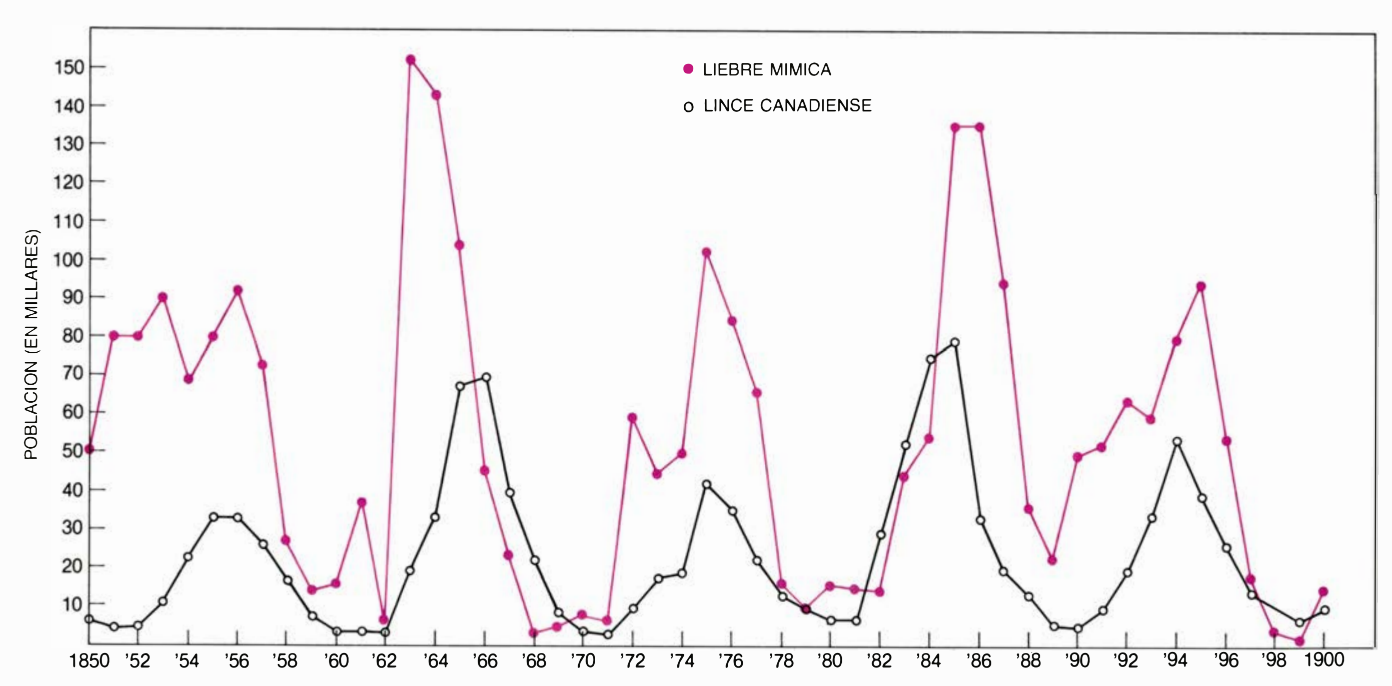
El océano de Acua-Tor es toroidal por una razón muy sencilla: la redacción del programa se simplifica mucho si el océano carece de contornos o riberas. Supongamos que el océano haya de tener 32 unidades de anchura; es cosa sencilla utilizar números módulo 32 para las abscisas (coordenadas horizontales) de peces y tiburones. Si alguno de éstos ocupara en un cronón dado un punto de abscisa 31, apareciendo por tanto en el borde derecho de la pantalla, podría perfectamente tener en el cronón siguiente abscisa 32 (= 0) y presentarse en el borde izquierdo. El mismo sistema se usa en sentido vertical, para las ordenadas.

El océano toroidal de Acua-Tor da pie a ciertos efectos muy extraños, como ponen de manifiesto los siguientes problemas. En el primero de éstos se saca partido de un desliz cometido en una de las primeras versiones de mi programa ACUA-TOR. A causa de este desliz, en cada cronón los peces nadaban una unidad hacia el norte y, los tiburones, una hacia el este. Así pues, la única forma de que un tiburón pudiera comerse un pez era encontrarse ocupando la misma casilla que su presa. Dado el océano que se muestra aquí, ¿cuántos fueron los peces que nunca pudieron comerse los tiburones?

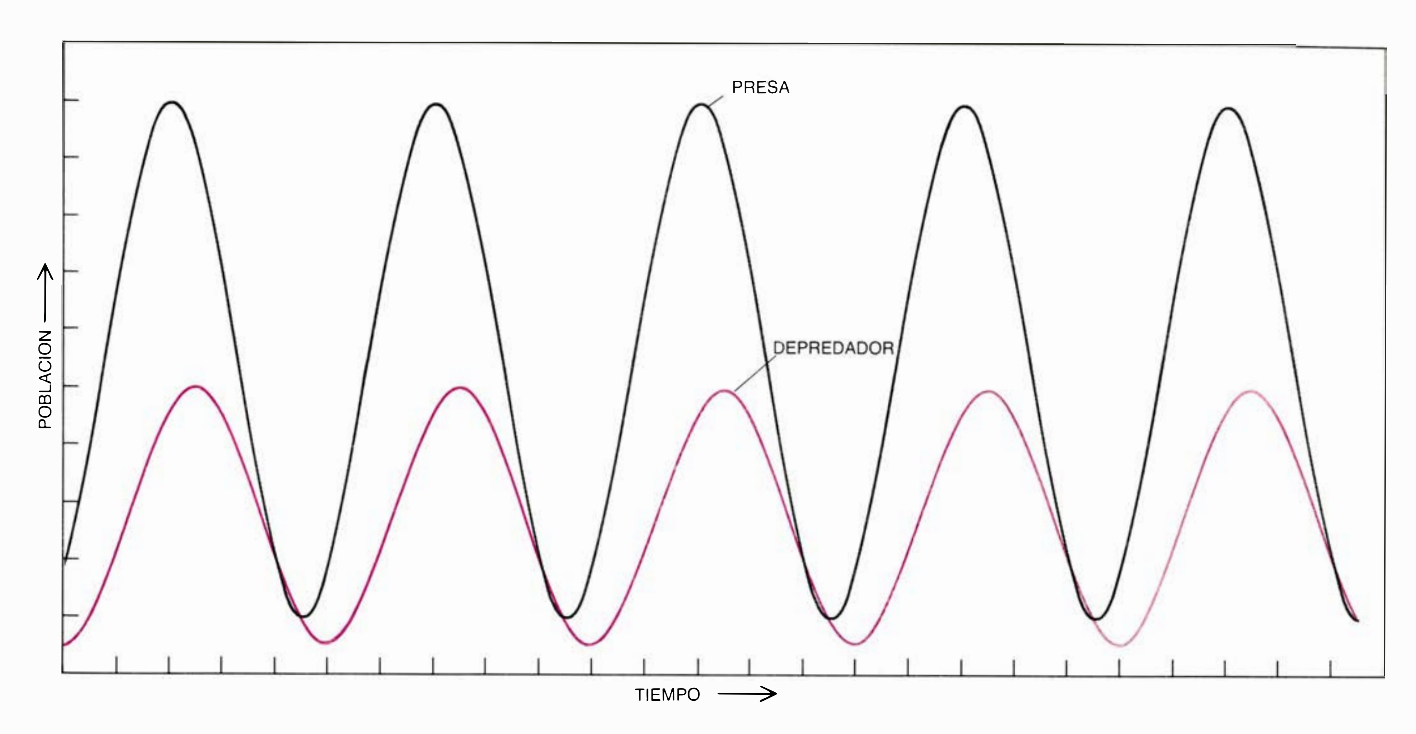


En otro de los problemas se supone que peces y tiburones son inteligentes. Imaginemos que cada pez y cada tiburón va por turno trasladándose hasta cualquiera de sus cuatro puntos vecinos. Resulta que un único pez, si es lo suficientemente inteligente, puede siempre escapar de un único tiburón, por muy inteligente que sea el depredador. En el océano tórico de Acua-Tor pudiera suceder que dos tiburones, acosando a un único pez, lograsen un resultado diferente. Si dotamos a cada criatura de tanta inteligencia como queramos, permitiendo incluso que los tiburones cacen cooperativamente, ¿podremos descubrir una vía de escape para el pez? El resultado no depende de las dimensiones del océano.

El artículo sobre perceptrones ("Juegos de ordenador", noviembre de 1984) les sugirió aplicaciones a unos



4. Número de linces y liebres (en unidades de millar) capturados anualmente para la Hudson's Bay Company, desde 1850 hasta 1900



5. Una relación teórica presa-depredador: una solución de las ecuaciones de Lotke-Volterra

lectores, mientras a otros los aguijó a emprender investigaciones sobre la cuestión por cuenta propia. Ed Manning, de Stratford, Connecticut, construyó hace diez años un perceptrón, diseñado para convertir imágenes reales en los cuadrados digitizados de la retina de un perceptrón. Manning fue una de las pocas personas que detectaron un error en el perceptrón de ventana capaz de reconocer uno o varios rectángulos, que se mostró al pie de la página 152 del número de noviembre: las cuatro últimas subpautas deberían ser cada una mitad de color y mitad blanca. Manning se preguntaba si el error se había provocado de manera "deliberada, para sondear el nivel de lectura". Me tienta decir que sí.

Gary D. Stormo, un investigador del departamento de biología molecular, celular y experimental de la Universidad de Colorado en Boulder, se ha valido de la noción de perceptrón para lograr el reconocimiento automático de pautas. En concreto, Stormo ha construido una función de ponderación al objeto de reconocer puntos de ligadura o enlace en secuencias de nucleótidos del ARN mensajero, y se vale del teorema de convergencia de los perceptrones para llevar el rendimiento del suyo al nivel óptimo. Los resultados han sido muy alentadores: el perceptrón reconoce con "éxito sustancial" los puntos de enlace.

Todo perceptrón de ventana que incluya en su lista de subpautas una ventana totalmente en blanco o totalmente en negro es un "buen" perceptrón. Lowell Hill, de Venice, California, se fijó en ello y se preguntó si una retina enteramente en blanco o en negro constituye una imagen legítima. La respuesta dependerá del tipo de motivos que se quiera reconocer. En el caso de percepción de rectángulos, parece razonable admitir que una retina negra sea, sencillamente, un gran rectángulo.

En el curso de una incursión sumamente fructífera en el mini-proyecto de investigación sugerido por mí, Constantine Roussos, del Lynchburg College Computer Center, de Lynchburg, Virginia, optó por excluir los perceptrones de ventana con subpautas enteramente en blanco o enteramente en negro. Entre sus logros se cuenta una caracterización de los buenos perceptrones (aquellos que reconocen cuando menos un patrón). Su caracterización se vale de relaciones de traslación entre las subpautas de ventanas que figuran en la lista del perceptrón. Al desplazar una unidad según cualquiera de las cuatro direcciones principales a cada una de esas subpautas, la figura resultante tiene que ser otra de las subpautas de la lista.

Roussos profundizó entonces en los perceptrones de ventana minimales, o sea, aquellos cuya lista de subpautas no pueden ulteriormente reducirse sin destruir la bondad del perceptrón. Tales perceptrones son los ladrillos con los que construir el conjunto de los buenos perceptrones. Roussos escribió un programa de ordenador que descubrió todos los perceptrones de ventana minimales que tenían tamaños de lista de órdenes 2 a 5. No existen perceptrones de ventana de orden 6 que sean minimales. Roussos lanza entonces un desafío, volviendo del revés la tarea por mí propuesta en aquel artículo. Yo pedía que los lectores hallasen una pauta que fuese reconocida por un perceptrón dado; Roussos, en cambio, sugiere hallar perceptrones capaces de reconocer una pauta determinada, dada de antemano.

John M. Evans, de Hartford, Connecticut, achaca los fallos de los perceptrones a las limitaciones inherentes a una jerarquía de sólo dos niveles, compuesta por los demonios locales y un único demonio jefe, al que informan. Introduciendo una especie de gerencia demoníaca intermedia, Evans logra vencer las limitaciones sobre reconocimiento de la conexión que Minsky y Papert descubrieron para los perceptrones ordinarios. Los propios demonios de nivel bajo constituyen una especie de retina, cuyos blancos y negros corresponden a si ciertos demonios informan o no. Un segundo estrato de demonios vigila la pauta creada por los demonios del nivel bajo e informa al demonio-jefe de la presencia de subpautas. Un dispositivo de tres niveles logra distinguir cuáles de los cuatro patrones de prueba son conexos y cuáles no lo son.

Taller y laboratorio

Configuración radial de las ondas de filo por vibración de los líquidos

Jearl Walker

Las ondas de filo son estructuras escasamente conocidas que adoptan una configuración radial en torno a un objeto que vibre en un líquido. El primero en dar noticia de ellas fue el sempiterno curioso Michael Faraday, el 1 de julio de 1831. Había dispuesto un trozo de madera, largo y rectangular (que llamó placa), sujeto encima de un cuenco con agua en la que se adentraba una corta distancia. Cuando hizo vibrar la placa, observó que "se formaban unas elevaciones al parecer permanentes, que nacían en la placa y que se proyectaban desde ella hasta una distancia de entre ocho y doce centímetros, o más, cual si fueran las púas de un peine basto".

Al día siguiente Faraday, a quien suele recordarse por sus investigaciones precursoras de la teoría electromagnética, produjo ondas de filo generando vibraciones en un gran recipiente de vidrio lleno de agua casi hasta el borde. Tras humedecerse un dedo, lo pasó por encima hasta que la pared del recipiente se puso a vibrar. Entonces, extendiéndose radialmente desde la pared, vio las crestas de las ondas de filo. Esta misma configuración se crea en una copa con vino u otro líquido cuando se frota el borde con un dedo para producir un zumbido.

Este artículo acerca de las ondas de filo está inspirado en estudios recientes de C. J. R. Garrett, en el Instituto de Geofísica y Física Planetaria de la Universidad de California en San Diego cuando los realizó, y J. J. Mahony, B. J. S. Barnard y W. G. Pritchard, de la Universidad de Essex. Además, Robert E. Apfel, de la Universidad de Yale, acaba de enviarme un manuscrito en el que describe sus investigaciones en torno a este tema. Empezaré con los experimentos de Faraday, de tan fácil desarrollo que pueden realizarse en la misma cocina. Luego describiré mis propias experiencias con un generador de olas, que es un aparato habitual en las clases de física de bachillerato.

Faraday, en su primer experimento, puso la placa a vibrar golpeteándola en el centro con el dedo, o percutiendo en ese punto con una varilla de vidrio que vibraba al ser golpeada con un dedo húmedo. Entonces se engendraban ondas cuando el extremo inferior de la placa oscilaba paralelamente a la superficie del agua.

Las ondas acuáticas se dan en dos tipos generales. Si el movimiento lo rige la gravedad, se llaman ondas de gravedad. Son de longitud de onda larga. Si el movimiento lo gobierna la tensión superficial, se llaman ondas de capilaridad; sus longitudes de onda son cortas. Las que nacían en la placa vibratoria de Faraday eran ondas de capilaridad corrientes.

En sentido perpendicular a la cara de la placa se formaban, además, cuatro crestas de ondas de filo. Faraday observó enseguida que, si bien tales crestas no cambiaban de posición, tampoco permanecían siempre en el mismo estado: se formaban y encogían con tal rapidez que producían la ilusión de inalteradas. De hecho las crestas contiguas estaban en oposición de fase una con otra: cuando la primera crecía, se contraía la segunda.

En su segundo experimento Faraday puso en juego una vibración dentro de una copa grande llena de agua casi hasta el borde. Al frotar éste con un dedo húmedo haciéndolo resbalar periódicamente, generaba vibraciones en la pared de la copa y éstas daban lugar a ondas de filo. En cuatro zonas del borde, las ondas no se presentaban nunca, o bien eran menos pronunciadas. Una de estas zonas se encontraba inmediatamente junto al dedo; las otras tres, a 90, 180 y 270 grados de éste. Entre esas regiones las ondas se presentaban pronunciadas. Conforme desplazaba el dedo siguiendo el borde, las posiciones de las ondas pronunciadas y poco pronunciadas se movían acompañándolo.

Faraday generó asimismo ondas de filo haciendo vibrar un diapasón que sumergió levemente en el agua. Cuando el instrumento vibraba con intensidad excesiva, en la superficie del agua se formaba una confusa erupción de gotas. Cuando la vibración era demasiado débil, sólo se creaban las ondas de capilaridad normales. A veces, la interferencia de éstas engendraba una configuración estacionaria entre las ramas del diapasón, pero no se trataba de ondas de filo. Estas se formaban cuando el diapasón vibraba con la intensidad adecuada, extendiéndose desde el instrumento e incluso, en ocasiones, borrando la configuración interferencial de las ondas de capilaridad normales.

Con las vibraciones del diapasón pudo crear también ondas de filo en tinta, mercurio, aceite tibio y gelatina fluida (líquida). En mercurio no duraban mucho porque la densidad del metal no tardaba en amortiguar la vibración del instrumento. En aceite frío no aparecieron, evidentemente por la gran viscosidad del medio.

Retornó entonces a su primer dispositivo de un objeto vertical vibratorio horizontalmente. En un tornillo de banco sujetó una varilla de madera que se extendía hacia abajo penetrando en un cuenco con agua. Al hacerla vibrar, generaba ondas de filo; cuanto más la hundía en el agua, menos numerosas eran las ondas, aunque más pronunciadas. Cuando la varilla vibraba demasiado intensamente, la superficie del agua se deshacía en gotas.

Al extremo inferior de la varilla sujetó luego un cartón, de veinte por siete centímetros aproximadamente. Cuando hacía vibrar la varilla, el cartón oscilaba horizontalmente dentro del agua. Surgían así múltiples crestas de ondas de filo, de un lado a otro de ambas caras del cartón.

En cada cara, las crestas contiguas oscilaban en oposición de fase unas con otras. No parecían guardar relación alguna las crestas de un lado del cartón con las del otro. Cuando sumergía un poco el cartón, vibraba rápidamente y se formaban innumerables crestas; cuando se sumergía más, la vibración era más lenta y menor el número de éstas.

Para estudiar el movimiento del agua dentro de la zona de las ondas de filo Faraday roció con polvos de licopodio y corcho finamente triturado la superficie líquida. En ningún caso se reveló una configuración de movimiento repetida, lo que significaba que no se establecían corrientes entre las ondas.

Las ondas de filo pueden asimismo formarse a partir de oscilaciones verticales. Faraday preparó una varilla de madera horizontal con un extremo sujeto a un tornillo de banco. Pegó al otro extremo un tapón de corcho de suerte que se introdujera en el interior de un cuenco con agua. Puso a vibrar la

varilla; el tapón oscilaba entonces verticalmente. Y "en torno al mismo se formó un hermoso conjunto de abundantes crestas, que se extendían dos, tres e incluso hasta cuatro pulgadas". Al hundir más el tapón en el agua, las crestas perdían intensidad.

Apfel ha descrito sus observaciones de ondas de filo en una copa de vino cuyo borde percutía con un dedo humedecido. Este resbala, se adhiere periódicamente al borde y genera ondas vibratorias en la pared de la copa. Ondas que, en su mayoría, se propagan por el vidrio y poco efecto producen, pero una de ellas posee una frecuencia tal que obliga a vibrar a la pared según una configuración repetitiva de oscilaciones radiales. De esta onda se dice que tiene la frecuencia resonante de la copa.

Durante la resonancia, la copa presenta cuatro regiones, sin vibración y regularmente espaciadas alrededor del borde. Entre ellas el vidrio oscila fuertemente en sentido radial. Este movimiento contra el vino crea, en esos puntos, unas ondas de filo muy bruscas.

Para contemplar estas ondas de filo hay que llenar la copa casi hasta arriba, pues sólo la parte superior de la copa vibra enérgicamente en la resonancia. El pie de la copa mantiene casi rígida su parte inferior.

La frecuencia resonante de una copa depende de la estructura y grosor de su pared y de la cantidad de vino que contenga. Una copa vacía tiene una frecuencia resonante elevada. A medida que se le añade vino, éste refrena la oscilación de las paredes y disminuye la frecuencia resonante.

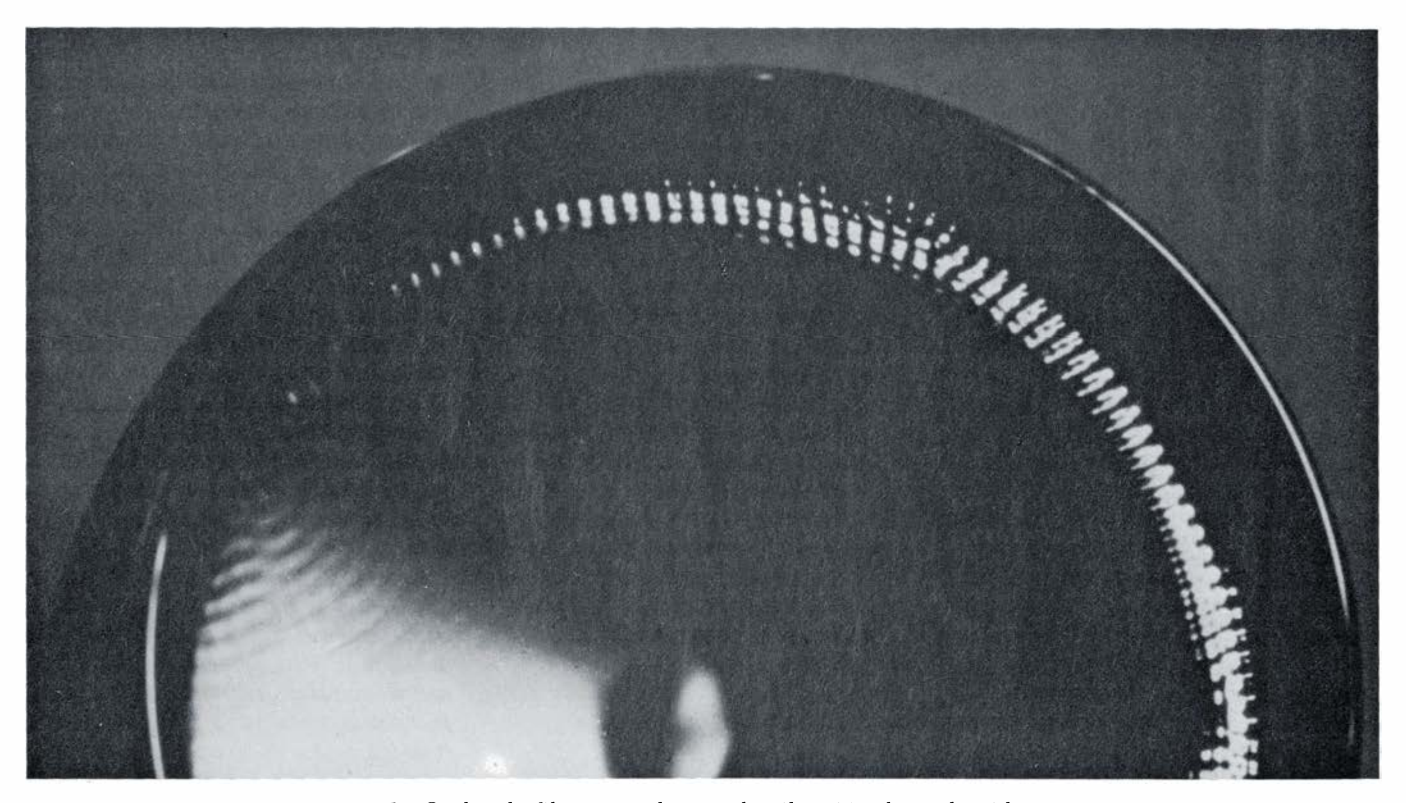
La distribución de ondas de filo acusadas y débiles acompaña al dedo en su movimiento, dificultando las observaciones. Para inmovilizar la distribución Apfel montó una copa sobre el plato de un tocadiscos; para hacerla más nítida a la fotografía, pintó la copa de negro. Con ésta casi llena de agua, mantuvo una esponja húmeda contra su pared para provocar la vibración. En otra foto sustituyó la copa por un plato de postre que contenía etilenglicol. El plato tenía una anchura de 20 centímetros y una frecuencia resonante de unos 200 hertz.

Sus experimentos con ondas de filo los han hecho Barnard y Pritchard con un recipiente de agua de 30,6 centímetros de ancho, 16 centímetros de alto y 2,7 metros de largo. Una aleta, engoznada a lo largo del fondo de un extremo del recipiente y que sobresalía de la superficie del agua, les servía para generar ondas. En el otro extremo del tanque había una playa en declive que absorbía las ondas de capilaridad que llegaban allí, para que no se reflejaran y retornaran a la zona de las ondas de filo. La aleta se hacía oscilar con un vibrador electromagnético excitado por un oscilador electrónico que funcionaba a baja frecuencia. Se tomaron grandes precauciones para estabilizar la corriente y, de ese modo, fuera repetible la creación de ondas de filo.

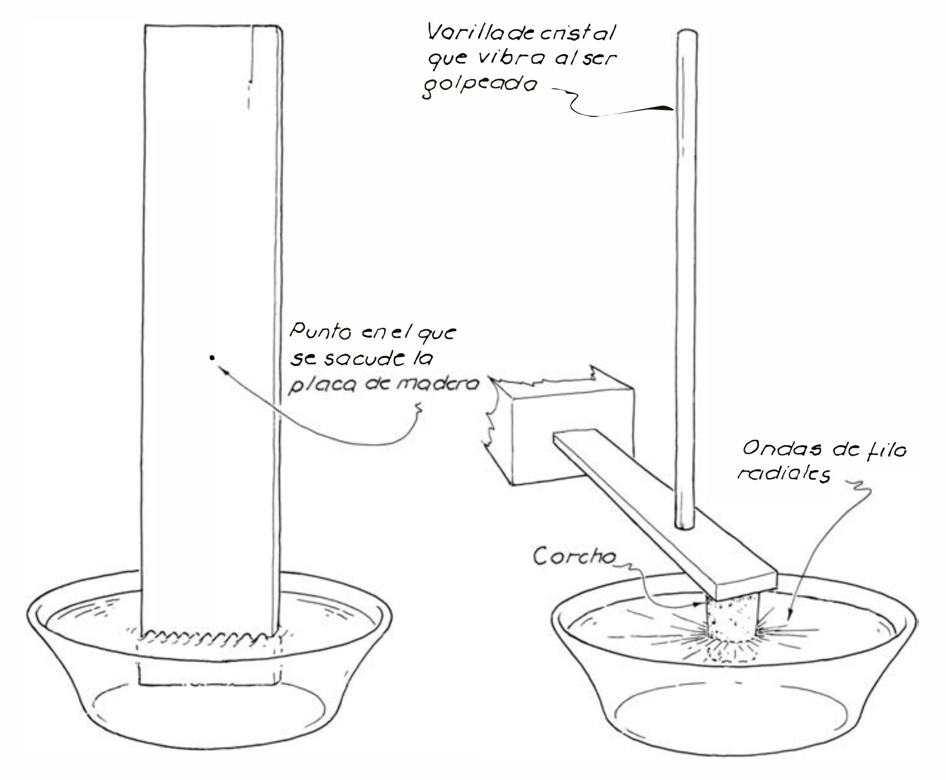
A ciertas frecuencias, en la superficie de la paleta expuesta al aire, aparecían las cadenas de ondas de filo. Estas, como en los experimentos de Faraday, eran perpendiculares a dicha superficie. Las oscilaciones, cuanto más rápidas, mayor número de crestas generaban, las más altas de las cuales se veían más cercanas a la paleta, disminuyendo de altura con la distancia a la misma.

Salvo en la vecindad de la aleta no aparecían ondas de filo en ningún otro sitio. Extrañamente, no se formaban en cuanto empezaba a oscilar la aleta (pero sí las ondas de capilaridad normales). Pero cuando ya se formaban, para lo que a veces tenía que pasar hasta un minuto, comenzaban creciendo lentamente y, después, rápidamente. Las crestas oscilaban verticalmente y su altura máxima variaba de una forma periódica. Un rasgo a destacar: para una cresta dada, su altura máxima variaba desde el máximo hasta el mínimo y al revés cada 50 segundos más o menos.

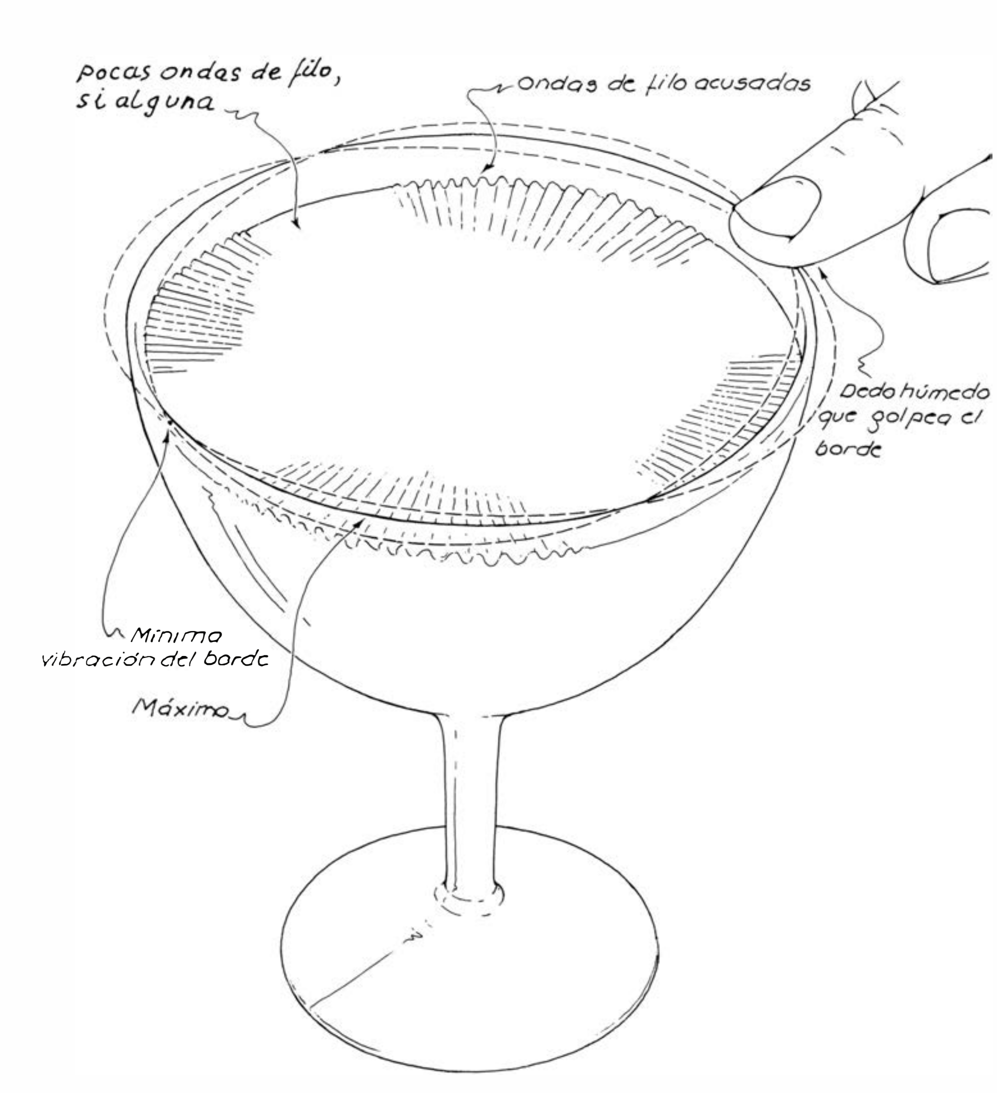
Parte de estos resultados experimentales se explican en el reciente trabajo teórico de Garrett y Mahony, quienes llegan a la conclusión de que las ondas de filo sólo puede producirlas un generador de olas del tipo de paleta o aleta oscilante. Tales ondas no las crea el tren de ondas de capilaridad normales que se propagan desde el generador,



1. Ondas de filo generadas por la vibración de un líquido



2. Experimentos con ondas de filo de Michael Faraday



3. Creación de ondas de filo en una copa

pues de lo contrario se las vería siempre que hubiera movimiento de ondas de capilaridad en el agua.

El campo de presiones que crea una paleta oscilante engendra inestabilidad en la superficie del agua. Y la producción y propagación de las ondas de capilaridad normales es un medio de que se mitigue esa inestabilidad. Evidentemente, la creación de una configuración estacionaria de ondas de filo es otro medio. Las crestas de ondas de filo alcanzan sólo una corta distancia desde la paleta, limitadas no por la disipación de su energía sino por el campo de presiones creado por la paleta.

De las ondas de filo se dice que son un caso de resonancia paramétrica, término derivado del tipo de ecuación diferencial que describe su movimiento. Característica de tal resonancia es que un movimiento (las ondas de filo aquí) tiene una frecuencia mitad que la del otro (el de la paleta). La paleta empuja el agua que tiene delante, creando una zona de tensión. Esta la alivia en parte la formación de las ondas de filo que oscilan a una frecuencia mitad que la paleta.

Cada empujón de la paleta proporciona más energía a las ondas de filo. Pero éstas no tardan en alcanzar un límite para el que, entonces, el flujo de energía se invierte.

Esta transferencia periódica de energía entre sistemas es asimismo característica de la resonancia paramétrica. Y es además la causa de que varíe la altura máxima de cresta en una distribución de ondas de filo. La altura adquiere su mayor valor cuando la paleta cede energía a la onda; es mínima cuando ésta la cede a la primera.

En mi caso, comencé con algunos experimentos sencillos en una copa llena de agua. Logré excitar las ondas frotando cuidadosamente el borde con un dedo humedecido. Para asegurarme su permanencia a la vista durante más tiempo, excité el vidrio con un altavoz accionado por una señal amplificada procedente de un oscilador de audio. Con cinta adhesiva fijé la base de la copa a una mesa. El cono abierto del altavoz lo puse en contacto con el borde de la copa y, así, podía gobernar la frecuencia e intensidad de las oscilaciones.

Cuando sintonicé el oscilador de audio a la frecuencia resonante de la copa, desde el límite del vidrio y hacia el interior se propagaron inmediatamente ondas de capilaridad circulares. Al cabo de unos 30 segundos o más, alrededor de la orilla se alzaron del agua las ondas de filo, las cuales alcanzaban hasta un centímetro hacia adentro. Al

principio parecían crecer lentamente, pero luego mucho más rápido. Resultaban muy frágiles y desaparecieron cuando sacudí levemente la mesa al tomar mis notas. No tardaron en reaparecer. Con el oscilador a bajo nivel, las ondas de filo rodeaban una zona central relativamente encalmada. Mas a medida que incrementé la intensidad de la señal, se extendieron hacia el centro del líquido, formando ondulaciones de complicado dibujo.

Giré el cono del altavoz hacia el techo y coloqué sobre él un vidrio de reloj parcialmente lleno de agua. No aparecieron ondas de filo; tal vez, no pude crear resonancia en la pieza.

Probé luego a producir ondas de filo con un aparato de masaje que es esencialmente un oscilador sencillo. Lo introduje en un tazón con agua; casi al instante, desde él se propagaron las ondas de capilaridad y a su alrededor surgió asimismo una configuración de ondas de filo. Esta se desplazaba poco a poco en sentido horario, porque el oscilador vibraba asimétricamente.

El resto de mis experimentos los realicé con un oscilador que recuperé de un viejo aparato de olas de los habituales en las aulas para mostrar la interferencia ondulatoria. Separé el motor con su carcasa y los sujeté con abrazaderas a un soporte anular. Del árbol del motor salía un vástago vertical y, cuando lo puse en marcha con corriente continua, su extremo inferior comenzó a oscilar horizontalmente.

Para construir una paleta accionada por el vástago recorté un rectángulo plano de chapa fina; la pinté de negro con pistola, con la idea de que contrastara con las ondas acuáticas. En el centro de la parte superior de la paleta pegué un clavo cuya punta pasé por un agujerito existente en el extremo inferior del vástago suspendido del motor. El clavo quedaba fijado con un tornillo.

La abrazadera que sujetaba al motor la bajé hasta que el trozo de chapa se sumergió algunos milímetros en un recipiente rectangular con agua (una fuente para asar al horno de vidrio). Cuando di la corriente, el trozo de chapa actuó de paleta al oscilar horizontalmente. Aumentando la tensión en la fuente de alimentación me era posible aumentar la frecuencia de oscilación de la paleta.

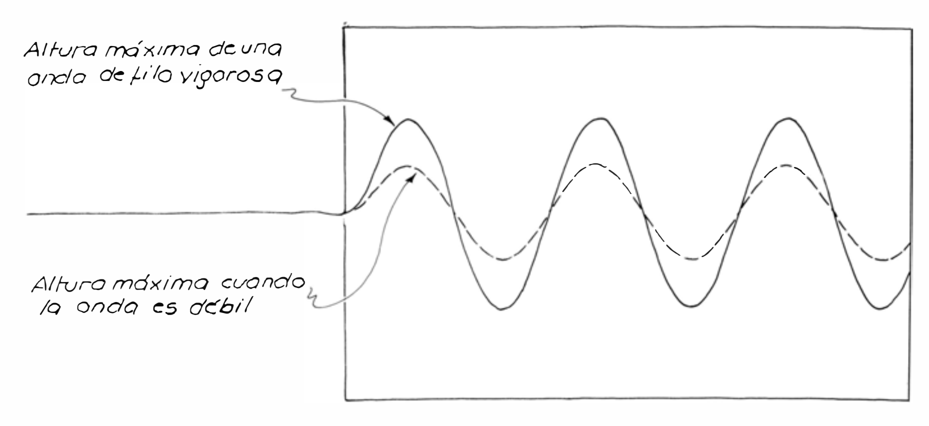
Debo advertirles que este dispositivo puede resultar muy peligroso. Procúrese que el motor se mantenga seco y que todos los contactos eléctricos queden bien separados del agua. Si la paleta comenzara a expulsar gotas de agua del recipiente, córtese la corriente.

En mis experimentos aumentaba yo paulatinamente la corriente hasta que el motor comenzaba a reaccionar. Intensificaba un tanto la fuerza eléctrica y examinaba la superficie de la paleta a la busca de ondas de filo. Como éstas no aparecen enseguida, esperaba algunos minutos antes de aumentar más la corriente.

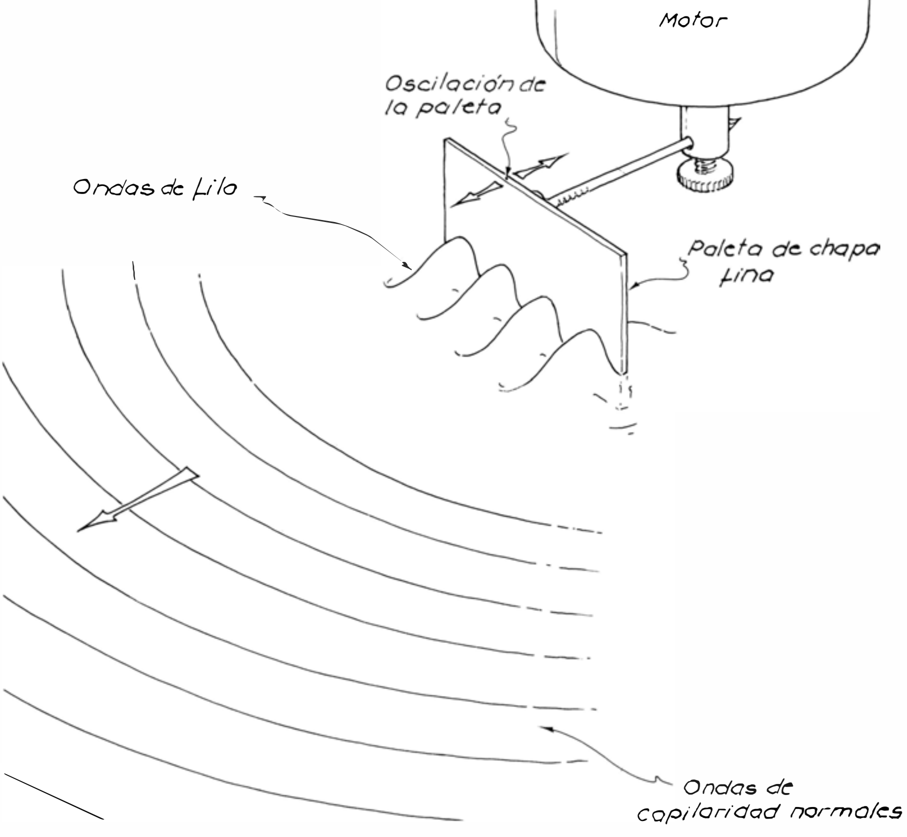
Al final, la oscilación de la paleta adquirió tal viveza que del agua surgieron ondas de filo. A lo largo de la cara de la paleta aparecieron cuatro crestas que se prolongaban un centímetro. Una formación igual apareció en la otra cara. Al siguiente incremento de la frecuencia de oscilación se crearon ya cinco crestas.

Para que me facilitara el examen de una eventual circulación organizada rocié la superficie del agua con pimienta negra molida. Como Faraday, no descubrí ninguna. Observé las ondas lateralmente (de modo que veía a la paleta moverse de izquierda a derecha). Entonces, la cresta más cercana ofrecía el aspecto de una protuberancia con una mala cuadrícula superpuesta, que se extendía desde la zona borrosa ocupada por la paleta. Tanteé las ondas con varios objetos, entre ellos otra tira de chapa. Resultaron ser muy estables, incluso ante los obstáculos que se colocaran directamente frente a todas.

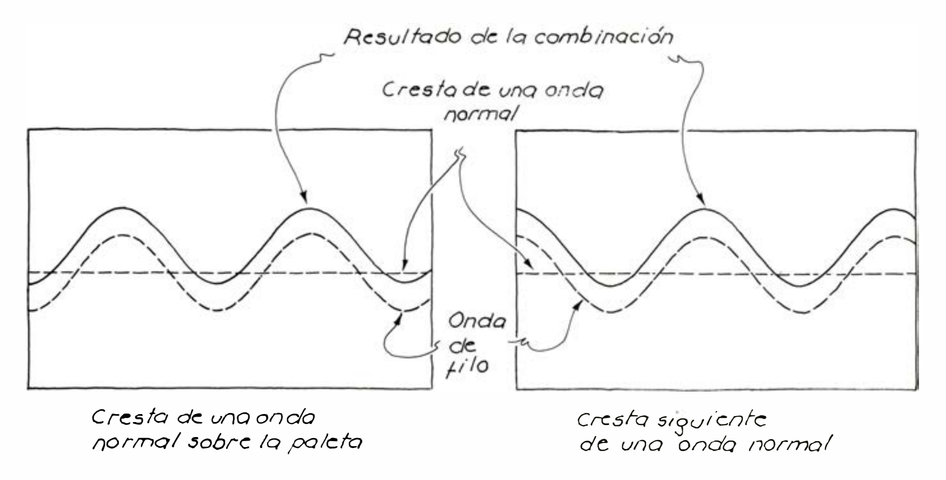
Para que destacaran, apagué las bombillas de la habitación y encendí una luz estroboscópica. Cuando los destellos se acompasaron a la frecuencia de la paleta, ésta apareció inmovili-



4. Variaciones en la altura de las crestas



5. Instalación casera para estudiar las ondas de filo



6. Formación de las crestas

zada. Pero como las ondas de filo oscilan a una frecuencia mitad que la paleta, seguí viéndolas en movimiento. Si delante de la paleta hay cuatro crestas, durante el destello se distinguen dos. Si de las dos que se ven una es la que está más a la izquierda, la que está inmediatamente a la derecha de ésta no se ve, la siguiente a la derecha de ésta sí se distingue, pero no la que está más a la derecha. En el destello siguiente se invierten los papeles.

Aunque la oscilación de las crestas debería ser visible con luz estroboscópica, a mí me resultó excesivamente rápida para seguirla. Tampoco pude salvar la dificultad reduciendo a la mitad la frecuencia de los destellos. En este caso, la paleta volvía a inmovilizarse; a cada destello se revelaba, sin embargo, el mismo conjunto de crestas.

Por último opté por una frecuencia de destello algo menor que la mitad de frecuencia de la paleta. A cada uno de los destellos sucesivos se revelaba así un conjunto de crestas levemente distinto. El que vi primero disminuyó gradualmente, mientras el otro crecía sobre el agua. Cuando este nuevo conjunto alcanzó su máxima altura, comenzaba a disminuir a la vez que reaparecía el original. Estos cambios, bastante lentos, se seguían bien.

Con una cadencia de destello ajustada pude, por fin, comprender cómo se forman las crestas. Resultan de la combinación de ondas de capilaridad normales con ondas de filo. En la figura 6 se ilustran dos casos en que la paleta está completamente adelantada con la cresta de una onda de capilaridad normal ocupando su frente. En el primero, la onda de filo presenta un máximo hacia la izquierda. Este máximo se combina con la cima de la onda normal para producir una cresta en la paleta. Algo más hacia la derecha se crea otra cresta.

En el segundo caso la paleta se ha retirado y vuelto a avanzar, de modo que la cima de la onda normal siguiente ocupa todo su frente. La formación de crestas resulta, también, de la combinación de la onda de filo con la normal. Como la primera oscila a la mitad de la frecuencia de la segunda, no habrá desarrollado un ciclo completo. A la izquierda de la paleta la onda de filo presentará ahora un mínimo. Y, así, las crestas surgidas de la combinación de las ondas de ambos tipos aparecen desplazadas con respecto a las que se mostraban en el avance anterior de la paleta. Al avance siguiente se recrearán las crestas iniciales.

Construí varias paletas más en sustitución de la plana. Pegando la cabeza del clavo al lado convexo fabriqué una semicircular. Las ondas de filo aparecieron en las dos caras. A otra le di forma de *S*, para que su frente (cara opuesta al clavo) presentara a la vez una superficie cóncava y otra convexa. Aquí, en la parte cóncava apareció una cresta pronunciada y otra más rechoncha en la parte convexa. En otro caso, practiqué una ranura en el borde inferior de una paleta plana; aún así se formaron ondas de filo.

Construí otra paleta con tres lados de un rectángulo; y le pegué el clavo en el centro del lado convexo. En ambas caras aparecieron ondas de filo, pero no a lo largo de las superficies que se deslizaban por el agua presentando una sección transversal pequeña.

La última de mis paletas la constituyó un pequeño aro metálico que encontré en la cocina. Cuando el motor lo impulsó horizontalmente surcando el agua, alrededor de la pared interna aparecieron ondas de filo y también en algunos puntos de la exterior. Pero la conformación de éstas no era perfecta, ya que el motor pecó de inestabilidad en su esfuerzo por accionar un objeto tan pesado.

Retorné a la paleta plana para estudiar el nacimiento de las ondas de filo por lenta elevación de la tensión de la fuente de alimentación, con la subida consiguiente de la frecuencia de la oscilación. A cada incremento hacía una pausa, pues las ondas de filo se generan con lentitud.

Una vez aparecidas las ondas disminuía la tensión y, con ello, la frecuencia de oscilación. Entonces las ondas de filo persistían, aun cuando la tensión fuese muy inferior a la requerida para iniciarlas. Evidentemente, la frecuen-

7. Paletas diversas para generar oscilaciones

cia de paleta necesaria para mantener las ondas de filo es menor que la necesaria para iniciarlas, por la presumible razón de que se requiere una buena dosis de energía para generarlas. Cuando disminuí la tensión un poco más las ondas desaparecieron pausadamente, tardando lo mismo que en aparecer cuando la tensión era más alta.

Con las ondas formadas me detuve a examinar el intercambio periódico de energía entre ellas y la paleta. Apagué las luces para ver las crestas ininterrumpidamente. Estimé así el tiempo que necesitan para descender sobre el frente de la paleta, hasta su mínima altura desde su máxima y a la inversa. Resultó un tiempo típico de 14 segundos.

A continuación vertí sobre el agua aceite de maíz al tiempo que observaba las ondas de filo. Las primeras gotas se esparcieron en una capa fina. El aceite fue concentrándose luego en grandes charcos hasta acabar con un grosor de varios milímetros.

La formación de ondas de filo no pareció alterarse hasta algunos minutos después de haber añadido el último aceite. Entonces, desapareció la formación. Pensé que el aceite sería excesivamente viscoso para sostener ondas de filo, o que habían desaparecido probablemente a causa de la masa flotante de gotas de agua y burbujas de aire batida por la paleta. Verifiqué lo segundo esperando hasta que la masa tuviera tiempo de deshacerse en una capa uniforme de aceite. Cuando puse en marchar la paleta, las ondas de filo no se demoraron.

Me pregunté además si las ondas de filo podrían formarse en la superficie de separación entre el agua y el aceite. Entonces coloqué cuidadosamente la fuente de asar medio al aire desde el borde de una mesa y así me las arreglé para examinar la tal superficie desde el fondo. No descubrí indicios de formación alguna de ondas de filo, ni siquiera cuando éstas se manifestaban pronunciadamente en la superficie libre.

Para mis últimas experiencias vertí una lata de aditivo para aceites industriales por encima del agua. Se trataba de un fluido sumamente viscoso. No aparecieron ondas de filo. Sería que el fluido resultaba demasiado viscoso o el motor demasiado débil para impulsar con fuerza suficiente a la paleta en un medio tan espeso.

Las letras que el mes pasado solicité a los lectores que identificaran en las figuras de difracción formaban la palabra MORISN y pretendían sugerir el nombre de Philip Morrison, de la redacción de SCIENTIFIC AMERICAN.

Libros

Crisis económica, teoría de las reacciones químicas, física del láser y participación española en el platino

Antonio Argandoña, José Font, M. G. Velarde y F. Aragón de la Cruz

BEYOND THE TURNING POINT. THE U.S. ECONOMY IN THE 1980'S, por Ezra Solomon. W. H. Freeman & Co., San Francisco 1982. Nuestro conocimiento de la crisis económica que se fue gestando en los años 60 e irrumpió en los 70 se ha ido completando poco a poco, conforme hemos ido acumulando teorías, datos, diagnósticos y soluciones. El hombre de la calle aún sigue confundido por la verborrea de los economistas, las tesis de corto alcance de algunos políticos y un conjunto de hechos que le causan preocupación y que no entiende bien. Sobre todo, le cuesta encontrar el hilo conductor, la lógica de la crisis. ¿Por qué los países productores de petróleo eligieron 1973 para su primer asalto al bienestar del mundo? ¿Quién o quiénes fueron los culpables de las altas tasas de inflación de los años 70? ¿Por qué entró en crisis el sistema monetario internacional precisamente en esos años? ¿Es lógico que la comunidad financiera norteamericana acogiera los planes de Reagan con unos tipos de interés inusitadamente elevados?

Este es el tema del libro de Ezra Solomon: explicar qué ocurrió a la economía norteamericana, desde la fase brillante de los años que siguieron a la segunda guerra mundial, que culmina en los años 60 –cuando empiezan a aparecer los problemas– hasta el estallido de los 70, y su resolución –no definitiva, pero sí apuntada, cuando la Asociación de Alumnos de la Universidad de Stanford publicó la primera edición de este libro, en 1981. Se trata de una obra clara, bien escrita, con muy pocos tecnicismos, en un lenguaje que entenderá el lector interesado, aunque no sea economista. Es, por otro lado, un libro para norteamericanos; aunque se refiera también a problemas y experiencias de otros países, se ocupa principal y casi exclusivamente de los de Estados Unidos.

De todos modos, el lector no americano también sacará gran provecho del libro, que explica con brevedad las causas, tanto inmediatas como profundas, del conjunto de problemas que hemos llamado "la crisis de los 70", y que no fueron muy distintos en los Estados Unidos y en el resto del mundo (en parte porque nosotros los "importamos" de ellos). A pesar del título, es más un relato de los problemas pasados que una tesis sobre el futuro.

El nudo del libro queda reflejado en su título: los años 80, desde la elección de Reagan, marcan un cambio de rumbo en la política económica de los Estados Unidos. No es sólo una nueva política, sino también una nueva manera de entender la economía. Los años 70 son, en este sentido, una "divisoria de aguas" (cap. 2), que deja atrás las acciones que llevaron al país y al mundo occidental a la inflación (cap. 3), a la irresponsabilidad energética y a su dependencia de la OPEP (cap. 4) y al crecimiento desmedido del papel del gobierno (cap. 5), siguiendo metas inalcanzables o peligrosas, como el crecimiento sin límites del gasto público, el pleno empleo a cualquier precio o la redistribución de la renta a costa de las clases productivas. El viraje –el "turning point" a que se refiere el título– se va dando poco a poco, conforme la evidencia de los hechos se va imponiendo a los errores de los teóricos y de los políticos, y adquiere forma en los planes del presidente Reagan (cap. 6), planes que Solomon ve con clara simpatía. El futuro, después de todo esto, no será una extrapolación del pasado, ni siquiera una repetición moderada de sus problemas (cap. 1).

Este es uno de los puntos más atractivos del libro: la tesis de que estamos asistiendo a un cambio de prioridades, que se ha abierto paso entre los expertos –con todas las salvedades que semejante afirmación exige–; con él llega la esperanza en un comportamiento económico mejor, que los resultados del primer mandato de Reagan parecen confirmar, aún a pesar de las incógnitas que siguen en pie. Solomon no explica con detalle cuál es el nuevo rumbo, que parece limitar a la corrección de los errores del pasado.

Dentro de su sencillez, el libro es útil para el lector no especialista, pues se apoya en sólidas bases analíticas, explicadas sin tecnicismos. Se encontrarán en él versiones plausibles de los diversos fenómenos y sus relaciones, comentarios sobre diferentes escuelas y sus ideas, abundancia de cifras y datos, etcétera, con todo lo cual el lector podrá formarse su propia composición de lugar acerca de la crisis, desmontando mitos como el de que toda la culpa del problema del petróleo la tiene la OPEP –el punto de vista del libro es que fueron los errores de política de los países occidentales y, sobre todo, de los Estados Unidos los que provocaron la situación que la OPEP aprovechó.

Ezra Solomon, profesor desde hace muchos años en la Graduate School of Business Administration de la Universidad de Stanford, miembro del Consejo de Asesores Económicos del Presidente en 1971-73 y conocido experto en Finanzas, no ha escrito un libro innovador, pero sí una explicación brillante y clara de los problemas y sus soluciones. Las lagunas que pueda haber se pueden justificar por su finalidad divulgadora. Las tesis discutibles –como la del papel pasivo desempeñado por la OPEP en los acontecimientos energéticos de 1973 y 1979– no restan interés al libro. Y la guía del lector –pág. 144 a 146– será también una buena ayuda, sobre todo para el interesado en la economía norteamericana. (A. A.)

TEORÍA ORBITÁLICA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS, por José Castells. Editorial Alhambra, S. A., Madrid 1983. Fue esencial para el desarrollo de la química el establecimiento de la teoría estructural propugnada por Friedrich August Kekulé a mediados del siglo XIX. A través de una visión arquitectónica y asignando una rayita a cada enlace químico o valencia, mediante esta teoría podían representarse todo tipo de moléculas. El desarrollo de la misma explicó no sólo todos los problemas de isomería constitucional y de estereoisomería, sino que representó un

decidido avance para comprender también el problema de la reactividad química.

Los modelos del átomo divisible, con un núcleo de protones y neutrones alrededor del cual giraban los electrones, no alteró sustancialmente la validez de la teoría estructural; más bien ésta se reforzó con la idea de Lewis que asignó a cada rayita de Kekulé (es decir, al enlace) un par de electrones de la periferia del átomo. La química se convirtió entonces en algo que pasa a distancias muy alejadas del núcleo, quedando como un problema de movimiento y trasvase de electrones. La teoría estructural modificada por la del enlace de valencia sirvió de base al entendimiento de este movimiento y trasvase de electrones periféricos. Ingold desarrolló un modelo simple de representación de este movimiento y así pudieron explicarse muchas de las reacciones de la química orgánica.

Los enormes progresos registrados en la síntesis de sustancias orgánicas (es decir, aquellas cuyo sustrato consiste en un esqueleto carbonado) se basan en la explotación al máximo de la teoría estructural ampliada por Lewis e Ingold. La obtención de colorantes, fármacos, polímeros, cosméticos, aditivos alimentarios, insecticidas, herbicidas, etc., etc., que han transformado nuestra sociedad, tiene su origen en las visiones arquitectónicas del mundo molecular de Kekulé.

Sin embargo, el modelo planetario del átomo, fundado en la concepción material y puntual del electrón, ha ido quedando relegado por la descripción ondulatoria del electrón. Cualitativamente, en esta descripción el electrón puede ocupar una serie de orbitales de energías determinadas. La "forma" y energía de estos orbitales (zonas del espacio donde existe gran probabilidad de encontrar el electrón) puede calcularse, para los casos de átomos y moléculas sencillas, mediante la resolución de la ecuación de Schrödinger pertinente al problema concreto en estudio. Este es, en realidad, el nudo gordiano de la mecánica cuántica, pues la resolución exacta de la ecuación de Schrödinger, en general, es imposible para casos más complejos que el átomo de hidrógeno.

Sin embargo, aunque hay que introducir simplificaciones, a veces drásticas, la concepción formalista de los orbitales atómicos y moleculares y su escalonamiento energético ha revolucionado la visión arquitectónica de la teoría estructural. El químico se ha ido habituando a "ver" orbitales *s* esféricos, orbitales *p* en forma de ocho, orbitales *d* de variada forma... en los átomos y orbitales moleculares tipo σ y π en el lugar donde antes –y ¡aún ahora!– ponía rayas de enlace. Este hábito no sólo ha servido para explicar la estructura (la forma) de las moléculas, sino que, más recientemente –aproximadamente desde hace veinte años–, para explicar la evolución de las reacciones químicas.

Este es el tema que el profesor José Castells aborda en el libro que comentamos. Recogiendo las ideas expresadas por Woodward y Hoffmann en 1965 y por Longuet-Higgins, Dewar, Pearson, Klopman, Salem y Flemming con posterioridad, Castells, en el estilo altamente didáctico y pedagógico que le caracteriza, nos introduce en la interpretación orbitálica de las reacciones químicas. Utilizando sus propias palabras, la aportación que hace se resume en los puntos siguientes: (*a*) tratamiento conjunto, con terminología unificada, de contribuciones logradas por diversos autores, empleando enfoques teóricos distintos; (*b*) extensión de las ideas de Woodward y Hoffmann y de otros autores a las reacciones elementales básicas y comunes a muchos procesos químicos; (*c*) comentario y justificación de unas normas sencillas y generales que regulan el funcionamiento de todas (o de la gran mayoría) de las reacciones químicas.

El primer capítulo está dedicado a una revisión de conceptos generales de la reacción química: mecanismos, control termodinámico, control cinético, reacción elemental, perfiles de reacción, postulado de Hammond, retención e inversión de configuraciones, etc. La lectura de este capítulo es una delicia, pues Castells en una treintena de páginas expone conceptos básicos que, muchas veces, el excesivo bagaje matemático con que se tratan los temas de la reacción química no dejan aflorar a la superficie. El autor presupone que el lector posee ciertos conocimientos de mecánica cuántica, al menos aplicada al átomo de hidrógeno, y que, por tanto, la forma de los orbitales atómicos, incluso los híbridos, le es conocida. Quizás hubiera sido interesante en este capítulo introducir brevemente las nociones de los orbitales atómicos y moleculares más comunes, aunque somos conscientes que el libro va dedicado a estudiantes avanzados –en realidad la materia expuesta constituyó, durante cierto tiempo, el tema de un curso de doctorado–, y que por tanto dichas nociones les deben ser ya familiares.

El capítulo segundo introduce el tema clave de la reacción química elemental. Cuando dos entidades moleculares se aproximan para reaccionar exponen a interacción sus electrones más externos. Como que la carga de estos electrones es la misma, las dos entidades deberían repelerse y la reacción química debería ser posible sólo en aquellos casos en que las entidades soportaran cargas formales opuestas (cationes y aniones) y la atracción coulombiana venciera la repulsión electrónica. Sin embargo, estos electrones ocupan unos orbitales de forma y energía determinadas; lo que es más importante: pueden ocupar orbitales vacíos (de forma y energía también determinadas) de las entidades reaccionantes para proporcionar los nuevos orbitales. La reacción química puede venir gobernada no sólo por la carga eléctrica de las entidades reaccionantes, sino también por la interacción entre *todos* los orbitales moleculares de las dos entidades y muy especialmente por los ocupados más externos y los no ocupados más internos (orbitales frontera).

La teoría que ayuda a resolver el problema de las interacciones orbitálicas es la de perturbaciones y la ecuación que da el balance energétido total resultante de la interacción *incipiente* de las dos entidades reaccionantes es la de Fukui-Klopman-Salem. En este capítulo el autor desarrolla una exposición clara de dicha ecuación; al final del mismo el lector queda completamente familiarizado con ella y con sus formas límites: transiciones químicas controladas por la carga y transiciones químicas controladas por los orbitales frontera (HOMO y LUMO).

Los capítulos 3 y 4 (un conjunto de unas cien páginas) se refieren ya a la explicación de reacciones químicas concretas utilizando los conceptos introducidos con anterioridad. En primer lugar se revisan reacciones en las que, en formulación de Lewis, interviene sólo un par de electrones. Se estudian así los ácidos y bases duros y blandos (denominados de un modo más general por el autor como aceptores y cesores duros y blandos), las transiciones electrofílicas (con mucho detalle) y las transiciones nucleofílicas. Las reacciones de los enolatos, los superácidos, la adición de halógeno a un doble enlace carbono-carbono, la sustitución aromática electrofílica, la sustitución alifática bimolecular, las adiciones de nucleófilos, las reacciones de sustitución, etc., etc., son cuestiones comentadas con prolijidad y extensamente, dándose tablas de los coeficientes de orbitales atómicos en orbitales moleculares y de balances

energéticos una vez aplicada la ecuación de Fukui-Klopman-Salem. Este tipo de descripción del problema, paso a paso, no se encuentra fácilmente en otros libros sobre este tema y por ello lo hace sumamente válido.

Finalmente en el capítulo 5 se estudian las reacciones pericíclicas, es decir, aquellas en que de forma concreta se crean y rompen enlaces por movimiento cíclico de electrones en el estado de transición. Este tipo de reacciones son las que llevaron a Woodward y Hoffmann a enunciar sus famosas reglas de permisibilidad o prohibición, según la topología de los orbitales involucrados: para que una reacción pericíclica sea permisible la simetría de los orbitales moleculares debe conservarse a lo largo de la coordenada de reacción. El autor prefiere en este capítulo abordar primero todas las posibilidades de reacciones pericíclicas en las que intervienen dos pares de electrones; aunque muchas de estas reacciones quedan topológica y geométricamente prohibidas, su estudio teórico proporciona la base para tratar reacciones más complejas, como las cicloadicionales de Diels-Alder, las transposiciones de Claisen, de Cope, las citoadicionales 1,3-dipolares, las transposiciones sigmatrópicas, las reacciones quelotrópicas, etcétera.

Creo que es absolutamente necesario que al menos la conclusión que da el autor sobre las reacciones químicas elementales sea conocida por todos: la química es impar; es decir, en todas las transposiciones químicas permitidas por la topología de los orbitales, la suma del número de pares de electrones que entran en juego y el número de inversiones debe ser un número impar. (J. F.)

LASER PHYSICS. Dirigido por J. D. Harvey y D. F. Walls. Springer-Verlag, Berlín 1983. Contiene el presente volumen los textos presentados en el tercer simposio neozelandés de física de láseres, celebrado en la Universidad de Waikato, en Hamilton, Nueva Zelanda, en enero (su verano) de 1983. Las precedentes reuniones tuvieron lugar en 1977 y en 1980, respectivamente, anunciándose la próxima para 1986.

Teóricos y físicos experimentales participaron en el simposio abordando un área puntera de la física de obvias posibilidades tecnológicas. La descripción y estudio de fenómenos oscilatorios (biestabilidad óptica, descubierta en 1979 y futuro transitor óptico de la fotónica) y caóticos (turbulencia en óptica), así como la superfluorescencia, abundan con justa razón y énfasis. Son los objetos de moda en la década de los actuales años ochenta. El interés proviene de que el láser es uno de los osciladores no lineales por excelencia tanto para el teórico como para el experimentador. Se puede *jugar* tanto con la no linealidad de las ecuaciones como con el número de ecuaciones, en el ordenador y a veces analíticamente; y nos podemos divertir con los parámetros (material excitable láser, dimensiones y forma de la cavidad resonante, excitaciones externas, etcétera) en el laboratorio.

La variedad de fenómenos oscilatorios o caóticos aparece en toda su riqueza. No se olvide que el láser es junto con la convección natural el paradigma en el estudio de los fenómenos cooperativos, o sea, en el estudio de los sistemas complejos con muchos elementos interrelacionados cuya evolución se hace en condiciones muy alejadas del equilibrio. El láser es instrumento técnico-industrial de espectacular alcance: corte, agujereado, soldadura de chapas, microsoldadura, bisturí médico y otros; es también un elemento utilísimo como sonda para el físico y químico de la materia condensada o gaseosa (física molecular y atómica) y prometedor agente en la fusión por confinamiento inercial (fusión con láser).

Recomendamos el libro para las bibliotecas de departamentos de física, de electrónica, de telecomunicaciones, entre otros, a la vez que nos permitimos abogar por la enseñanza de la física del láser en los estudios del segundo ciclo universitario de las carreras científicas y técnicas. (M. G. V.)

A HISTORY OF PLATINUM AND ITS ALLIED METALS, por Donald McDonald y Leslie B. Hunt. Johnson Matthey, Londres 1982. Son los autores dos destacados químicos de la compañía Johnson Matthey, que ha mantenido una posición privilegiada en la investigación y desarrollo tecnológico del platino y los elementos de su familia. La empresa publica, además, la revista *Platinum review*. El recorrido histórico que aquí se expone abarca desde su descubrimiento en formaciones sedimentarias, la "platina", hasta su purificación y separación de los otros elementos, con los que va aleado en su origen.

El desarrollo de las investigaciones necesarias para su purificación primero, y conocimiento de nuevas propiedades después, fue un reto que aceptaron las diferentes naciones de Europa con sus químicos y laboratorios. Aquellas arenas negras, encontradas en el distrito de Chocó, obispado de Popayán (actual Colombia), se transformaron, con el esfuerzo de numerosos científicos distribuidos por diferentes lugares de Europa, en láminas e hilos de platino, blanco y brillante, que dio origen al nombre "oro blanco". La historia de la ciencia cuenta, entre sus valores, la recuperación de procedimientos antiguos, que desechados en su momento por costosos o ineficientes, resultan oportunos al disponerse de nuevas técnicas.

Hay que remontarse al siglo XVIII, con el descubrimiento del platino en un lugar perteneciente a la actual Colombia por don Antonio de Ulloa. Este y Jorge Juan, ambos marinos, formaban parte de la expedición científica que la Academia de Ciencias de París había enviado al ecuador para medir en sus inmediaciones un arco del meridiano terrestre; de este modo, junto con las medidas realizadas cerca del polo norte (en Laponia) por otra expedición enviada allí por la Academia con la misma finalidad, se pretendía llegar a conocer la forma de la Tierra. Componían la expedición los académicos Godin, Bouguer y la Condamine y el botánico Jussieu, por parte francesa, y Jorge Juan y Antonio de Ulloa, por parte española. Por realizarse los trabajos de medición en un territorio que pertenecía a la corona de España, actual república del Ecuador, el gobierno impuso la condición de que participaran en todos los trabajos científicos Juan y Ulloa.

Una vez terminada la expedición, independientemente de los datos proporcionados a la Academia, los españoles redactaron un amplio informe, que ocupó varios volúmenes, en el que se incluían no sólo los datos de las medidas realizadas en el campo, con los cálculos matemáticos, sino también un amplio estudio de la historia natural de las regiones visitadas, incluyendo una descripción del estado de la minería. Se repartieron el trabajo: Jorge Juan escribió lo referente a los cálculos matemáticos y Ulloa la historia natural. Y así, aunque la obra está firmada por los dos, como la descripción del platino aparece en la relación escrita por Ulloa, se atribuye a él su descubrimiento e introducción en los círculos científicos europeos.

Pronto se interesan los químicos por el platino. En los laboratorios españoles se diseña un método de purificación

que permite obtener un material maleable, útil para la fabricación de objetos científicos (crisoles y espejos para telescopios), de ornato (pitilleras y cajas o cofres) y religiosos (cálices, como el que Carlos III regaló al papa Pío VI, en 1789). El método de obtención de platino maleable, descubierto en España por Chabaneau y Fausto Elhúyar en 1786, no se publicó, por razones de estado, en las revistas científicas de aquella época. Así ocurrió que fue redescubierto por un químico inglés, William Hyde Wollaston (1766-1828). El libro que reseñamos estudia ampliamente estas investigaciones realizadas en España durante el siglo XVIII. Los autores le dedican dos capítulos: el segundo ("El platino de Nueva Granada") y el sexto ("La Edad del Platino en España").

Con la independencia de los países hispanoamericanos a lo largo del XIX, España pierde el monopolio que poseía sobre el platino; sus procedimientos metalúrgicos, redescubiertos en Europa, son postergados por la investigación subsiguiente. El descubrimiento de yacimientos de platino en Rusia, en los Urales, y las crisis políticas y económicas por las que pasan las nuevas naciones de América del Sur, y entre ellas Colombia, hace que el centro de gravedad en la obtención minera del platino se desplace a Rusia, cuyos químicos desarrollan un importante papel en la purificación y separación de los elementos de la familia del platino, e incluso fabrican monedas de curso legal.

La invención del soplete oxhídrico posibilita la fusión de mayores cantidades de platino que las realizadas por los procedimientos químicos anteriores: por vía seca (método del arsénico) o por vía húmeda (tratamiento con agua regia). La investigación avanza y se descubren sus propiedades catalíticas. A mediados del siglo XIX, Estados Unidos se interesa por la fabricación de platino maleable y se aviva otra vez la producción de los yacimientos colombianos. Se benefician los yacimientos de platino de Africa del Sur. "Por primera vez el platino y los metales ligados a él iban a ser sacados de la mina como productos principales, con níquel y cobre como subproductos, en contraste con las minas de Canadá y Sibería, fuentes principales de níquel y cobre con los metales del grupo de platino en segundo lugar."

El libro contiene, además, numerosas fotografías de científicos, instrumentos documentos de los siglos XVIII, XIX y XX. (F. A. C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

SATELITES METEOROLOGICOS

RADIATION IN THE ATMOSPHERE. Kondratyev. Academic Press, 1969.

SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES. Preparadas por R. List. Smithsonian Institution Press; Washington, 1976.

INTRODUCTION TO THE METEOSAT SYSTEM. Morgan y Jensen. ESA; Darmstadt, 1978.

THE ROLE OF SATELLITES IN WMO PROGRAMMES IN THE 1980'S en *Planning Report* n.° 36 (de la Vigilancia Meteorológica Mundial). OMM; Ginebra, 1980.

POTENTIAL BENEFITS FROM A EUROPEAN METEOROLOGICAL SPACE PROGRAMME. Lagarde. (Informe de ESA por contrato de EUROSAT, S.A.) Ginebra, 1980.

ECONOMIC IMPACT OF AN OPERATIONAL METEOROLOGICAL SATELLITE PROGRAMMME IN THE 80'S. Lagarde en *ESA-EXEC (80)-2*. (Informe por contrato de EUROSAT, S.A. para ESA.) Ginebra, 1980.

ATMOSPHERIC SOUNDING USER'S GUIDE. En *NOAA. Technical Report NESS 83*, dirigido por Werbowezki. Washington, 1981.

SYSTÈME DE LOCALISATION ET DE COLLECTE DES DONNÉES PAR SATELLITE. Argos; Toulouse, 1984.

MEMORIA ATOMICA

COHERENT OPTICAL SPECTROSCOPY. Richard G. Brewer en *Aux Frontières de la Spectroscopie Laser = Frontiers in Laser Spectroscopy*, dirigido por Roger Balian, Serge Haroche y Sylvain Liberman. North-Holland Publishing Company, 1977.

MICROSCOPIC THEORY OF OPTICAL LINE NARROWING OF A COHERENTLY DRIVEN SOLID. A. Schenzle, M. Mitsunaga, R. G. DeVoe y R. G. Brewer en *Physical Review A*, vol. 30, n.° 1, págs. 325-335; julio, 1984.

RECONOCIMIENTO MUTUO ENTRE NEURONAS EMBRIONARIAS

EMBRYONIC DEVELOPMENT OF IDENTIFIED NEURONES: DIFFERENTIATION FROM NEUROBLAST TO NEURONE. Corey S. Goodman y Nicholas C. Spitzer en *Nature*, vol. 280, n.° 5719, págs. 208-214; 19 de julio de 1979.

GUIDANCE OF NEURONAL GROWTH CONES: SELECTIVE FASCICULATION IN THE GRASSHOPPER EMBRYO. J. A. Raper, M. J. Bastiani y C. S. Goodman en *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, vol. 48, págs. 587-598; 1983.

NEURONAL GROWTH CONES: SPECIFIC INTERACTIONS MEDIATED BY FILOPODIAL INSERTION AND INDUCTION OF COATED VESICLES. Michael J. Bastiani y Corey S. Goodman en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 81, n.° 6, págs. 1849-1853; marzo, 1984.

CELL RECOGNITION DURING NEURONAL DEVELOPMENT. Corey S. Goodman, Michael J. Bastiani, Chris Q. Doe, Sascha du Lac, Stephen L. Helfand, John Y. Kuwada y John B. Thomas en *Science*, vol. 225, n.° 4668, págs. 1271-1279; 21 de septiembre de 1984.

REPRODUCCION DIGITAL DEL SONIDO

BLIND DECONVOLUTION THROUGH DIGITAL SIGNAL PROCESSING. Thomas G. Stockham, Thomas M. Cannon y Robert B. Ingebretsen en *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, n.° 4, págs. 678-692; abril, 1975.

DIGITAL AUDIO TECHNOLOGY. T. Doi, H. Nakajima, J. Fukuda y A. Iga. TAB BOOKS Inc., 1983.

DETECCION DE LA PRESA EN EL ESCORPION DE LA ARENA

PREY-LOCALIZING BEHAVIOUR OF THE NOCTURNAL DESERT SCORPION, *PARUROCTONUS MESAENSIS*: ORIENTATION TO SUBSTRATE VIBRATIONS. Philip Brownell y Roger D. Farley en *Animal Behaviour*, vol. 27, 1.ª parte, págs. 185-193; febrero, 1979.

FEEDING AND EXCRETION IN THE SCORPION *PARUROCTONUS MESAENSIS*: WATER AND MATERIAL BALANCE. Stanley Yokota en *Journal of Experimental Biology*, vol. 110, págs. 253-265; 1984.

EL POZO MAS PROFUNDO DEL MUNDO

THE KOLA SUPER-DEEP WELL: INTERIM RESULTS AND PROSPECTS, EPISODES. Yevgeny A. Kozlovsky en *Geological Newsletter* (Unión Internacional de Ciencias Geológicas), vol. 1982, n.° 4, págs. 4-11; diciembre, 1982.

KOMPLEKSNAYA PROGRAMMA GLUBINNOVO IZUCHENIYA ZEMNYX NEDR (EL COMPLEJO PROGRAMA DE ESTUDIOS PROFUNDOS DE LA TIERRA). Ye. A. Kozlovsky en *Sovetskaya Geologiya*, n.° 9, págs. 3-12; Izdatel'stvo Nedra (Editorial de Recursos Naturales), 1982. Traducido al inglés en *Petroleum Geology*, vol. 19, n.° 6, págs. 300-302; 1983.

ROTACION MENTAL DE LOS OBJETOS

MENTAL ROTATION OF RANDOM TWO-DIMENSIONAL SHAPES. Lynn A. Cooper en *Cognitive Psychology*, vol. 7, n.° 1, págs. 20-43; enero, 1975.

PERCEPTION. Julian E. Hochberg. Prentice-Hall, Inc., 1978.

ECOLOGICAL CONSTRAINTS ON INTERNAL REPRESENTATION: RESONANT KINEMATICS OF PERCEIVING, IMAGINING, THINKING AND DREAMING. R. N. Shepard en *Psychological Review*, vol. 91, n.° 4, págs. 417-447; octubre, 1984.

EL NAVIO DE LINEA ESPAÑOL

THE TRANSIENT PRESENCE: A REAPPRAISAL OF SPANISH ATTITUDES TOWARD THE NORTHWEST COAST IN THE EIGHTEENTH CENTURY. Christon I. Archer en *BC Studies*, n.° 18, págs. 3-32; verano de 1973.

THE CENTURY BEFORE STEAM. Alan McGowan. National Maritime Museum. Her Majesty's Stationery Office, 1980.

LA ARMADA ESPAÑOLA EN EL SIGLO XVIII. José P. Merino Navarro. Fundación Universitaria Española, 1981.

JUEGOS DE ORDENADOR

INTRODUCTION TO COMPUTER SIMULATION: THE SYSTEMS DYNAMICS APPROACH. Nancy Roberts, David F. Andersen, Ralph M. Deal, Michael S. Garet y William A. Schaffer. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1983.

TALLER Y LABORATORIO

CROSS-WAVES, PART 1: THEORY. J. J. Mahony en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, 2.ª parte, págs. 229-244; 26 de septiembre de 1972.

CROSS-WAVES, PART 2: EXPERIMENTS. B. J. S. Barnard y W. G. Pritchard en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, 2.ª parte, págs. 245-255; 26 de septiembre de 1972.